



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA ESTRATEGIA DE  
BRUÑIDO CON BOLA ASISTIDO POR VIBRACIONES SOBRE  
LA INTEGRIDAD SUPERFICIAL DEL ACERO AISI 1038**



**MEMORIA**

**Autor:** Javier Moreno García

**Director:** Ramón Jerez Mesa

**Convocatoria:** Octubre 2017



## Resumen

En este trabajo se van a estudiar los efectos del proceso de bruñido con bola sobre el acabado superficial en una probeta de acero AISI 1038, con una geometría rectangular de superficie totalmente plana. Se definirán cuatro factores de ensayo, con tres valores cada uno, y después se hará un diseño de experimento para establecer qué condiciones de ensayo va a haber en cada proceso.

Se realizarán nueve huellas con un proceso de bruñido distinto en cada una de ellas, y después se estudiarán dos propiedades físicas superficiales: la rugosidad y la dureza. Se tomarán datos de la superficie inicial antes del proceso, y se compararán los resultados con los obtenidos en cada huella. De esta manera, se podrá determinar si existe una mejora o no debida al proceso, qué porcentaje y qué factores son los más influyentes sobre el resultado final.

Por último, se determinará qué condiciones o qué factores se deberían tener en cuenta en función de los resultados que se quieran obtener, de las propiedades que se quieren lograr sobre la pieza en función de los esfuerzos a los que vaya a estar sometida o las condiciones para obtener un resultado lo más versátil posible.

## Resum

En aquest treball s'estudiaran els efectes del procés de brunyit amb bola assistit per vibracions sobre l'acabat superficial en una proveta d'acer AISI 1038, amb una geometria rectangular de superfície totalment plana. Es definiran quatre factors d'assaig amb tres valors cadascun, i després es farà un disseny d'experiment per establir quines condicions d'assaig ha d'haver-hi en cada procés.

Es realitzaran nou petjades amb un procés de brunyit diferent en cadascuna d'elles i després s'estudiarà dues propietats físiques superficials: la rugositat i la duresa. Es prendran dades de la superfície inicial abans del procés i es compararan els resultats amb els obtinguts a cada petjada. D'aquesta manera, es podrà determinar si existeix una millora o no deguda al procés, en quin percentatge i quins factors són els més influents sobre el resultat final.

Per últim, es determinarà quines condicions o factors s'haurien de tindre en compte en funció dels resultats que es desitgin obtenir, de les propietats que es volen aconseguir sobre la peça en funció dels esforços als que hagi d'estar sotmesa o les condicions per obtenir un resultat el més versàtil possible.

## **Abstract**

This thesis will be studying the effects of vibration-assisted ball-burnishing process on the surface of an AISI 1038 steel specimen, with a rectangular geometry and a completely flat surface. Four test parameters will be defined, with three values each, then the design of experiment will be made to establish which test conditions will be used in each process.

Nine samples will be burnished with a different burnishing process in each of them, then two surface physical properties will be studied: roughness and hardness. Also, data about initial surface conditions will be taken before the process and this data will be compared with the results obtained on each sample after the process. Thus, it will be possible to determinate if any improvement due to the process exists, in what percentage and what parameters are the most influential on the final results.

Finally, it will be determined what conditions or parameters should be considered depending on: the final results to be obtained, the properties to be obtained depending on the stress to which the sample will be subjected or the conditions to obtain a result the most versatile as possible.



## Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Juanjo y Mari, mis padres, por su amor incondicional y por habérmelo dado todo, sin ellos no estaría donde estoy y nada de esto hubiese sido posible. También a mi familia y amigos, por su apoyo y aportar un granito de arena cuando ha sido necesario.

En segundo lugar, a Ramón, mi tutor. Su inestimable ayuda y guía a lo largo del proyecto han sido imprescindibles, y su simpatía y confianza en mi forma de trabajar han sido la dosis de energía necesaria para llevar a cabo este proyecto.

Por último, y no menos importante, dedicar este trabajo a Felipe, mi abuelo. Una persona que nunca dudó de mis capacidades ni de llegar a dónde yo quisiese con sudor y esfuerzo, y que estoy seguro que allá dónde esté me estará viendo orgulloso terminar el camino que me vio empezar.

Arrivederci bambino.





# Contenido

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>RESUM</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>1. PREFACIO</b>	<b>1</b>
1.1. Origen del trabajo .....	1
1.2. Motivación .....	1
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
2.1. Objetivo .....	4
2.2. Alcance .....	4
2.3. Conceptos previos.....	5
2.3.1. Herramienta de bruñido con bola.....	5
2.3.2. Rugosidad superficial .....	8
2.3.3. Dureza Vickers .....	11
<b>3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO</b>	<b>13</b>
3.1. Material y tratamiento previo .....	13
3.2. Factores de ensayo .....	14
3.3. Sistema Taguchi .....	15
<b>4. METODOLOGÍA</b>	<b>17</b>
4.1. Bruñido .....	17
4.2. Estudio de la rugosidad.....	19
4.3. Estudio de la dureza superficial .....	20
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>25</b>
5.1. Rugosidad. Análisis gráfico .....	25
5.2. Rugosidad. Análisis ANOVA .....	27
5.3. Dureza HV500. Análisis gráfico .....	37
5.4. Dureza HV50. Análisis gráfico .....	41
5.5. Dureza HV. Análisis ANOVA .....	45
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>49</b>
<b>PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICO</b>	<b>51</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO I. CÓDIGO CNC</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO II. TABLAS DE RESULTADOS DE RUGOSIDAD</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO III. TABLAS DE RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE DUREZA HV</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO IV. TABLAS DE RESULTADOS DE DUREZA HV500</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO V. TABLAS DE RESULTADOS DE DUREZA HV50</b>	<b>70</b>

# **1. Prefacio**

## **1.1. Origen del trabajo**

El trabajo tiene su origen en estudios previos sobre el método de bruñido. Se basa en estudios anteriores llevados a cabo por el grupo de investigación DEFAM, que tratan sobre el método de bruñido con bola. Más en concreto, este trabajo permite dar continuidad a una línea de investigación mediante la cual se estudia y se determinan las condiciones más convenientes para la reducción de la rugosidad superficial en dos materiales, el acero y el aluminio.

Así, partiendo de los conceptos teóricos y de los resultados y conclusiones extraídos experimentalmente en trabajos anteriores sobre pasadas simples de bruñido, se estudiará el resultado de realizar una segunda pasada sobre la misma superficie que la primera, sus pros y contras y las mejores condiciones para un resultado óptimo dentro del rango de parámetros incluidos en el estudio.

## **1.2. Motivación**

El diseño y la fabricación siempre me ha llamado la atención, pienso que son dos temas fuertemente ligados y en los cuáles no se puede pensar en uno sin tener en cuenta el otro. Es importante tener en cuenta los distintos tipos de procesos existentes en el mercado para poder elaborar un diseño factible, tanto en términos de fabricación como económicos, y es necesario conocer el diseño para entender el proceso de fabricación.

Partiendo de esta premisa, me parece muy interesante conocer un sistema de acabado superficial distinto a los que hemos aprendido durante la carrera. Mientras que siempre he conocido los métodos tradicionales de mecanizado como el torno y la fresa, los cuáles he trabajado anteriormente, desconocía la existencia del acabado superficial mediante bruñido.

La diferencia básica entre este último y los anteriores es el método mediante el cual se consigue mejorar la superficie del material no es por arranque de material sino por deformación. Un concepto simple de entender, pero complejo de aplicar, y que gracias a este proyecto voy a conocer en mayor profundidad.



## 2. Introducción

El bruñido con bola [1] es un método de acabado superficial por deformación plástica de un material, normalmente mecanizado, mediante la acción de un penetrador en forma de esfera rodante. El proceso es particularmente complejo, en especial por 2 motivos:

- El primero está relacionado con el propio proceso de deformación plástica que sufre el material a lo largo del ensayo, complejo de modelar y comprender íntegramente.
- El segundo, con los numerosos parámetros que hay que tener en cuenta y que afectan directamente en el resultado final.

Al ser un proceso que no implica arranque de material, como podría ser un fresado o pulido, además del módulo de elasticidad hay que tener en cuenta este factor de auto endurecimiento del material, consecuencia de deformar la superficie y crear tensiones superficiales que dificultan progresivamente el proceso de sucesivas pasadas. De esta forma, el efecto del bruñido sobre la superficie no sólo es de tipo topológico, sino que también afecta la microestructura del material.

Un aspecto poco estudiado hasta el momento es el proceso con vibración asistida. La herramienta utilizada en este proyecto lleva incorporado un sistema que genera una vibración en la bola con la intención de provocar una disminución del límite elástico al generar una fuerza de deformación alterna. Este sistema, conocido como VABB (siglas en inglés de *vibration-assisted ball burnishing*), ha sido profundamente estudiado anteriormente por Travieso-Rodríguez [2], tanto en acero como en aluminio, con un sistema de vibración de 2,5 kHz de frecuencia. En nuestro caso, la herramienta es capaz de vibrar a una frecuencia de 40 kHz.

Otro aspecto, que apenas se ha estudiado anteriormente, es la influencia que tiene la dirección favorable del bruñido en las propiedades finales. López de Lacalle [3] ha comparado los resultados entre realizar un proceso de bruñido continuo y uno con bruñido por parches sobre piezas alabeadas, llegando a la conclusión de que este último permite una productividad mucho mayor en detrimento de una rugosidad superficial mucho mayor también.

Gómez-Gras, en su artículo sobre el estudio del bruñido con bola [4], ha determinado el ancho de paso lateral y la fuerza óptima para la primera pasada optimizando el tiempo total del proceso sin provocar un perjuicio en el resultado final. Es importante tener en cuenta estos parámetros ya que, al tratarse de un proceso por deformación plástica, el material tiende a fluir por los extremos de la bola a su paso, y éstas tensiones que se producen afectan directamente a la fluctuación del material con el paso de bola adyacente, hasta el punto de que podrían neutralizar o incluso empeorar los efectos del proceso respecto a las condiciones iniciales.

## 2.1. Objetivo

El objetivo del trabajo es estudiar la influencia del bruñido con bola en la superficie de acero AISI 1038 después de realizar una segunda pasada sobre un primer bruñido ya realizado. Partiendo de unos artículos previos en los que se describe tanto la herramienta como las condiciones óptimas para realizar la primera pasada, se determinarán las condiciones de ensayo de una segunda pasada y se estudiarán las características físicas del material para decidir cuáles son las condiciones óptimas para una segunda pasada en función de los resultados que se desean obtener.

## 2.2. Alcance

Para este proyecto, partimos de una placa de acero AISI 1038 que ya ha sido mecanizada su superficie previamente, por lo tanto, solo se estudiarán los parámetros para realizar el proceso de bruñido.

El objetivo del proyecto es analizar la influencia de estos parámetros, sin embargo, sólo se va a estudiar su relación directa con el acabado final y el fenómeno de auto endurecimiento del material. Así pues, no se estudiará cómo influyen los parámetros entre sí a la hora de determinar unas condiciones óptimas del proceso desde el punto de vista de otras variables más complejas de medir como, por ejemplo, las tensiones residuales.

El estudio se va a centrar en el análisis de las propiedades físicas de rugosidad y dureza superficial del acero tras realizar 2 pasadas de bruñido con bola, por lo tanto, no se van a estudiar otras propiedades físicas como la granulometría o propiedades químicas tras el ensayo.

Para determinar las condiciones de ensayo primero analizaremos los factores involucrados en el proceso que vamos tener en cuenta:

- **Vibración asistida (VABB).** Este factor lo tomaremos en cuenta cómo una progresión desde el proceso sin vibración asistida hasta el proceso completamente asistido. El proceso sin vibración asistida se denotará en adelante como NVABB.
- **Trayectoria.** Tomando como referencia la dirección favorable de la primera pasada, realizaremos un incremento progresivo en la inclinación del eje de desplazamiento de la segunda.
- **Fuerza ( $F$ ).** En base a estudios anteriores, dónde se determina la fuerza que provoca una deformación plástica óptima en la superficie, se decidirán nuevos valores de fuerza superiores para estudiar su comportamiento. Usualmente se han determinado valores de fuerzas críticas que demuestran un empeoramiento del acabado final en términos de rugosidad superficial.

- **Paso lateral ( $b$ ).** Estudios previos han determinado el paso lateral óptimo para el acero. En estos estudios la distancia máxima era  $b$ , y ahora se estudiará la posibilidad de incrementar esta longitud para valorar si produce una mejora.

## 2.3. Conceptos previos

Anteriormente hemos introducido la herramienta de bruñido con bola y los dos estudios que vamos a realizar para analizar las propiedades físicas resultantes, la rugosidad y la dureza. A continuación, vamos a explicar más extensamente cómo funciona la herramienta y los métodos para realizar los estudios de análisis.

### 2.3.1. Herramienta de bruñido con bola

El bruñido con bola es un proceso de trabajo en frío sobre la superficie del material que, mediante deformación plástica, consigue regularizarla y crear un efecto triple sobre ella. Por un lado, aumentar la dureza superficial y mejorar la rugosidad, y por otro generamos tensiones residuales que se propagan por la superficie interna del material.

Para entender por qué es importante el proceso de vibración asistida y la motivación de estudiar en mayor profundidad el impacto de este factor en el acabado superficial, hay que analizar el artículo de Travieso-Rodríguez [5]. En su estudio sobre los efectos del proceso de bruñido con vibración asistida con una frecuencia de 2,5 kHz, ha concluido que el proceso VABB mejora el acabado superficial en términos de rugosidad y de dureza. En la Tabla 1 se puede ver el porcentaje de mejora respecto las condiciones iniciales de la probeta para el proceso NVABB y el VABB, y el de mejora del proceso VABB respecto NVABB. Se puede observar que en todos los casos el proceso VABB mejora los resultados respecto al proceso NVABB.

Tabla 1.- Mejora del proceso VABB respecto al NVABB a 2,5 kHz

Factor	NVABB	VABB	VABB vs NVABB
$R_a$ paralela	33 %	52 %	37 %
$R_a$ perpendicular	77 %	80 %	5 %
$R_t$ paralela	55 %	65 %	10 %
$R_t$ perpendicular	58 %	60 %	5 %
Dureza HV	4 %	5 %	

La herramienta que podemos ver a continuación en la Figura 1, está diseñada, fabricada y caracterizada por Gómez-Gras [6], con un cono ISO para poder ser acoplada o directamente roscada a una fresadora. Incorpora un sistema de vibración asistida que se beneficia del efecto de acustoplasticidad. Este efecto provoca que un material sometido a una fuerza oscilante vea reducido su límite elástico, por lo tanto, es necesaria una tensión menor para provocar deformación plástica sobre él.

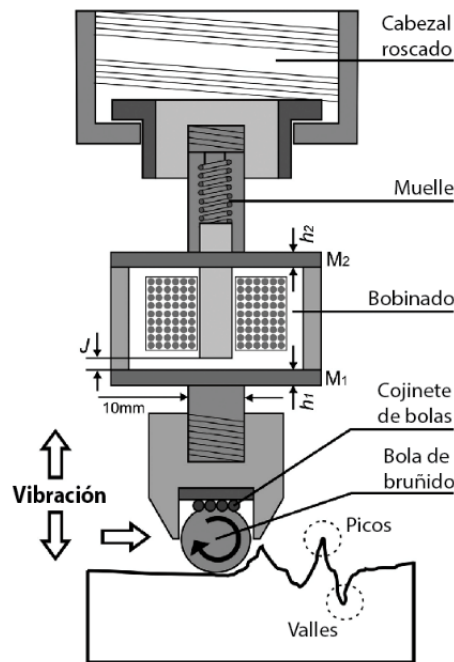


Figura 1. – Esquema de la herramienta de bruñido con bola

Para poder aportar vibración al proceso, la herramienta incorpora un bobinado que, por corriente eléctrica, genera un campo magnético que hace vibrar dos placas  $M_1$  y  $M_2$  unidas mediante un cojinete de bolas simple a la bola de bruñido situada en la punta, de 10 mm de diámetro, que vibra solidaria durante el proceso.

La herramienta que se utilizará en este proyecto, en lugar del módulo de vibración anterior, incorpora una cerámica piezoeléctrica que, excitada gracias a un generador de frecuencia externo de 40 kHz, hace vibrar con la misma frecuencia la bola de bruñido situada en la punta, de 10 mm de diámetro también. Para poder controlar la fuerza ejercida durante el proceso, se incorpora un muelle en el interior de la herramienta. Mediante una célula de fuerza conectada a una máquina de pruebas universal, se puede comprimir la herramienta a una velocidad conocida y a través del tiempo calcular la distancia. En la Figura 2 está representado un esquema de los componentes.



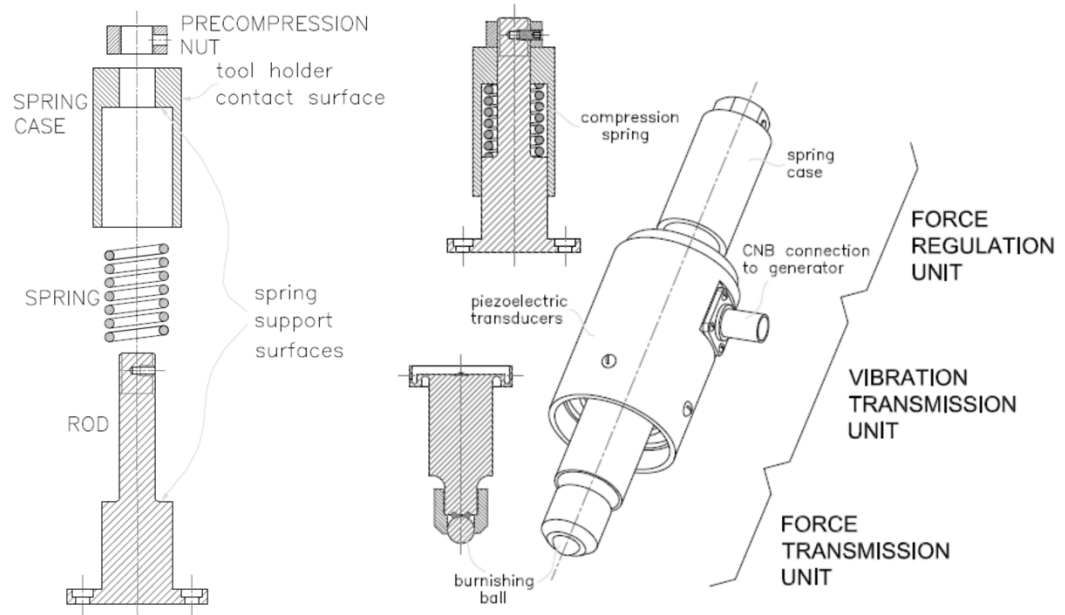


Figura 2. – Esquema de construcción de la herramienta

Finalmente, se obtiene una gráfica de calibración como la que se puede observar en la Figura 3, en la que, para cierto valor de fuerza deseado, se obtiene el valor de la coordenada Z negativa necesaria para programar el código ISO del proceso de bruñido.

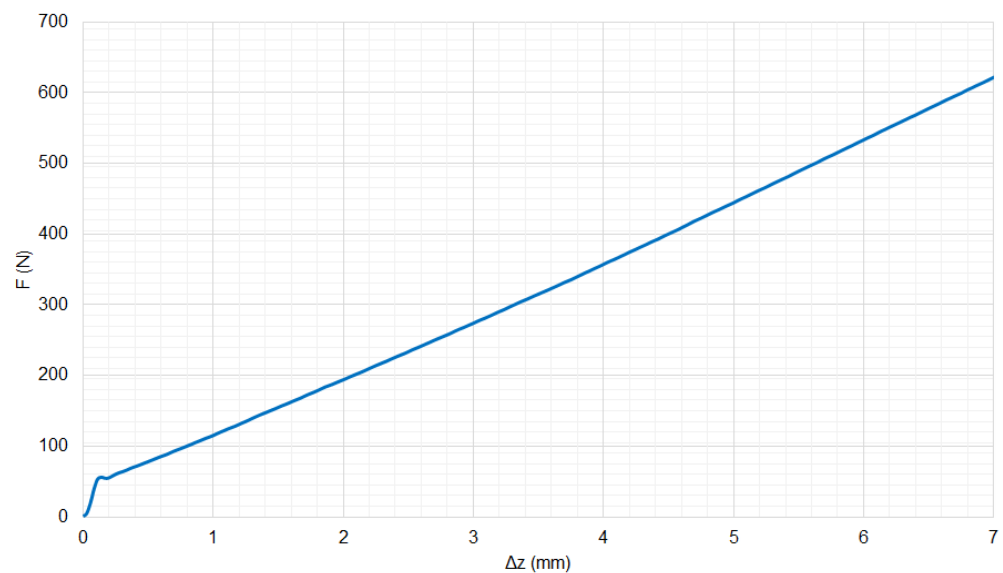


Figura 3. – Gráfica de calibración de la herramienta

### 2.3.2. Rugosidad superficial

La topografía superficial de una pieza mecanizada está definida básicamente por 3 factores: los defectos de forma, la ondulación de la superficie y la rugosidad (Figura 4). La rugosidad superficial, por tanto, es el conjunto de irregularidades de la superficie eliminando los factores de defectos de forma y ondulación de superficie.

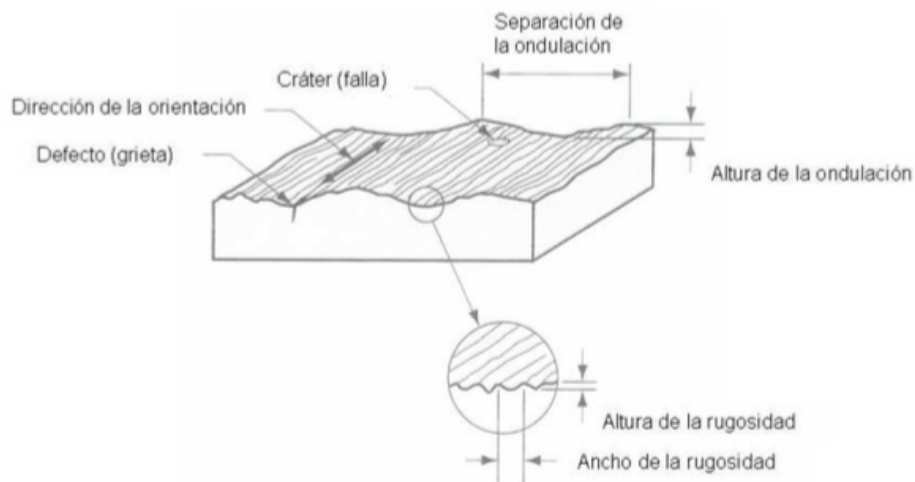


Figura 4. – Factores principales de la topografía superficial [7]

Los parámetros de rugosidad que vamos a estudiar en este proyecto son únicamente dos, la rugosidad media  $R_a$  y la rugosidad total  $R_t$ .

El parámetro  $R_a$  es la media aritmética de las distancias entre cada punto del perfil y la línea central, tanto por encima como por debajo, en positivo. La línea central es aquella que deja a ambos lados de la misma un área igual definida entre esta línea y el perfil de rugosidad. La ecuación (1) expresa el cálculo de esta rugosidad.

$$R_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |Y_i| \quad (1)$$

La Figura 5 muestra una representación de este parámetro, en el que las áreas por debajo de la línea central se han trasladado de manera simétrica respecto al eje de ordenadas para no tener áreas negativas, y  $R_a$  hace referencia a la distancia entre la línea central y la recta que cruza el punto medio del perfil.

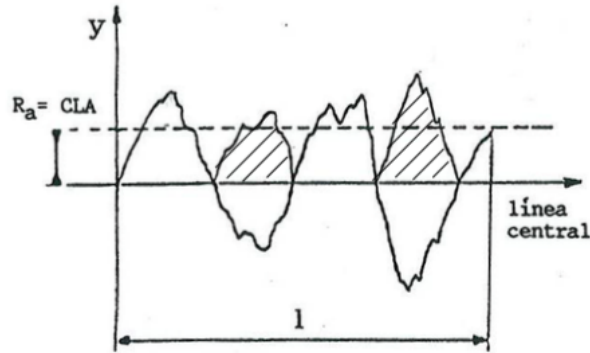


Figura 5. – Representación del parámetro  $R_a$  del perfil de rugosidad [7]

Por otro lado, el parámetro  $R_t$  es la distancia máxima entre pico y valle a lo largo del perfil de rugosidad. Para ello, se divide la sección de evaluación en  $n$  longitudes de corte o *cut-off*, y se hace una media aritmética de los valores con la longitud entre pico y valle más alta de cada longitud de corte mediante la ecuación (2). En la Figura 6 se puede ver un esquema con la representación de la longitud de corte (evaluation length) dividida en  $n$  longitudes de corte (sampling length).

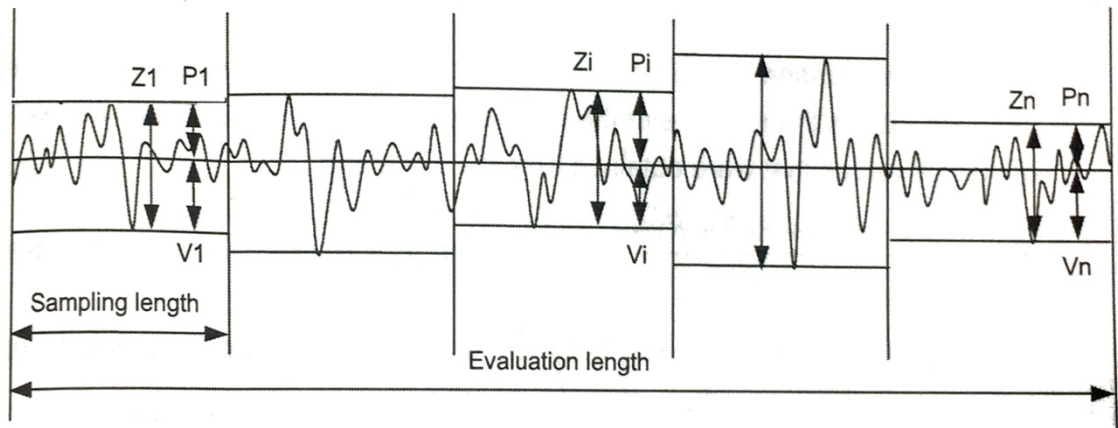


Figura 6. – Esquema de cálculo de la rugosidad  $R_t$

$$R_t = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n} \quad (2)$$

Aunque tanto la rugosidad media como total están relacionadas, no lo hacen de manera directa. Se pueden obtener valores de  $R_a$  similares aun teniendo valores de  $R_t$  distintos o viceversa. En el caso del proceso de bruñido, al deformar plásticamente la superficie estamos reduciendo en gran medida ambos valores de rugosidad.

Es importante tener en cuenta la ondulación ya que, a la hora de medir el perfil de rugosidad, podría afectar al análisis según la longitud de evaluación. Esta longitud de evaluación es igual a  $n$  veces la longitud de corte, y en el caso de ser demasiado alta se podría interpretar la ondulación superficial como variaciones de rugosidad. La longitud de corte es un valor muy importante, está estrechamente ligado a la rugosidad, y en función de la normativa de ensayo que se aplique hay establecida una longitud para un rango determinado de rugosidad, como se puede observar en la Tabla 2, bajo la normativa ISO1997.

Tabla 2.- Estándar de longitud de corte y evaluación para  $R_a$  según norma ISO1997

Rango $R_a$	Longitud de corte	Longitud de evaluación
$0,006 < R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$	0,08 mm	0,4 mm
$0,02 < R_a \leq 0,1 \mu\text{m}$	0,25 mm	1,25 mm
$0,1 < R_a \leq 2,0 \mu\text{m}$	0,8 mm	4 mm
$2,0 < R_a \leq 10,0 \mu\text{m}$	2,5 mm	10 mm
$10,0 < R_a \leq 80,0 \mu\text{m}$	8 mm	40 mm

### 2.3.3. Dureza Vickers

La dureza es la propiedad del material que describe la resistencia que ofrece un material a ser penetrado, cortado, rayado, o cualquier otra alteración por otro material.

El ensayo de dureza Vickers se trata de un ensayo no destructivo. Emplea como penetrador una punta de diamante en forma de pirámide rectangular (Figura 7), y sus principales ventajas son:

- Por el material y la forma geométrica del penetrador, permite estudiar materiales de altas durezas
- Puede emplearse para medir durezas superficiales
- No es necesario cambiar el penetrador al variar la carga y las huellas son comparables entre sí, independientemente de la carga utilizada



Figura 7. – Penetrador de diamante para ensayo de dureza Vickers [8]

En la Figura 8 podemos observar un esquema del ensayo Vickers. Las caras del penetrador forman un ángulo de  $136^\circ$  entre ellas, y al ser en forma de pirámide, la huella resultante es mucho más fácil de medir que en otros ensayos.

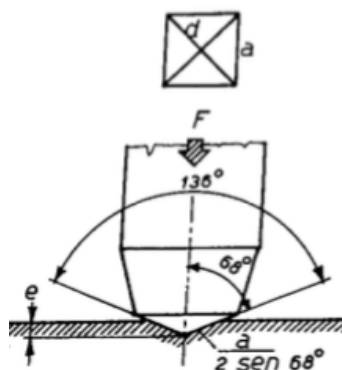


Figura 8. – Esquema del ensayo de dureza Vickers y la forma de huella [8]

Una vez realizada la indentación, se procede a medir la huella. Para ello, se tomarán las medidas de las dos diagonales  $d_1$  y  $d_2$  (véase Figura 9), y con la media aritmética utilizaremos la ecuación (3) para calcular la dureza Vickers del material.

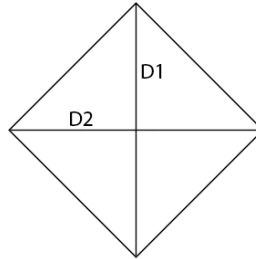


Figura 9. – Medidas de las diagonales de la huella

$$HV = 1,8544 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

Dónde:

- **HV:** Dureza Vickers del material
- **d:** Media aritmética de las diagonales de la huella (en mm)
- **F:** Fuerza empleada en el ensayo

### 3. Diseño del experimento

#### 3.1. Material y tratamiento previo

El material escogido para el ensayo es una probeta de acero AISI 1038 de unas medidas aproximadas de 100x80x10 mm. En la Tabla 3 se muestran las propiedades principales del material.

Tabla 3.- Propiedades físicas del acero AISI 1038 [9]

Propiedad	Valor	Comentarios
Densidad	7,845 g / cm <sup>3</sup>	Calculado a partir de dureza Brinell
Dureza Brinell	163	
Dureza Vickers	170	
Módulo de elasticidad	205 GPa	
Módulo de elasticidad	485 MPa	
Tensión de ruptura	570 MPa	Basado en acero AISI 1212 (100%)
Maquinabilidad	65 %	

La superficie ha sido previamente planeada con una fresadora *LAGUN 600 CNC* y una fresa de  $\varnothing 100$  mm, 4 dientes, a una velocidad de corte de 90 m/min y un avance de 400 mm/min. Con esto nos aseguramos de trabajar sobre una base uniforme y completamente horizontal para posteriormente realizar el proceso de bruñido y las mediciones necesarias para determinar rugosidad y dureza.

La Tabla 4 muestra las condiciones iniciales de rugosidad media  $R_a$ , rugosidad total  $R_t$  y dureza de la probeta. Se han medido a lo largo del eje X y del eje Y, con una longitud de corte  $\lambda_c$  de 0,25 mm y una longitud total de evaluación de 1,25 mm, y para la dureza con un peso de 500 gramos.

Tabla 4.- Condiciones iniciales de la probeta

Dirección	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	Dureza HV500
x	0,216	1,111	322
y	0,328	1,522	

### 3.2. Factores de ensayo

En el artículo [4] se determinan las condiciones óptimas para la primera pasada, que se pueden observar en la Tabla 5 mostrada a continuación.

Tabla 5.- Condiciones óptimas para la primera pasada

Factor	Valor	Unidad
Fuerza	90	[ N ]
Paso lateral	0,35	[ mm ]

En base a estos resultados, vamos a diseñar un sistema de 4 factores con 3 niveles (véase Tabla 6).

- **Vibración asistida (VABB).** Estudiaremos el proceso desde NVABB hasta 2 valores de vibración asistida, el 50% y el 100%. Esto se codifica en el diseño del experimento a través de la amplitud de la vibración, con valor nulo para el caso NVABB, y los otros dos valores para el VABB.
- **Trayectoria.** El eje favorable de la primera pasada es el eje Y, y respecto a éste haremos una inclinación de 0, 45 y 90 grados para estudiar los efectos de una segunda pasada, codificados de aquí en adelante como PAR –paralelo-, 45DEG y PERP –perpendicular- respectivamente.
- **Fuerza (F).** Con la fuerza de referencia de 90 N, estudiaremos el caso de 2 múltiplos superiores de esta fuerza para estudiar el efecto de fuerzas mayores aplicadas. Tomaremos valores de 180 y 270 N.
- **Paso lateral (b).** Anteriormente se ha determinado una  $b = 0,35$  mm como un valor óptimo. Vamos a estudiar unos valores de  $1,2b$  y  $1,4b$  para estudiar el efecto de distancias mayores, y si mejoran la rugosidad final o no.

Tabla 6.- Factores de ensayo y sus niveles

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Unidad
VABB	0	50	100	[ % ]
Trayectoria	0	45	90	[ ° ]
Fuerza	90	135	180	[ N ]
Paso lateral	0,35	0,42	0,49	[ mm ]



### 3.3. Sistema Taguchi

Con el sistema de factores definido anteriormente, deberían realizarse  $3^4$  ensayos para tener una visión completa de cómo afectan todos los factores al resultado final y la interacción entre ellos. Para evitar realizar 81 ensayos se utilizará el sistema Taguchi para crear un arreglo de diseño que requiera de menos repeticiones, y acortar el tiempo de experimentación. Esta decisión es consecuente con el alcance de este proyecto, que contempla poder conocer de forma genérica la influencia de los diferentes factores sobre las variables de respuesta.

El sistema Taguchi es un sistema enfocado a la calidad en ingeniería y basado en la estadística, en el que se estudian los factores que influyen en el producto final, diferenciando entre los factores de control y los factores de ruido. Los primeros son los que se pueden controlar o variar y los segundos son factores que influyen en el resultado, pero no es posible su alteración o modificación.

En el ensayo, los 4 factores son factores de control, de manera que del diseño de Taguchi solo se adaptará su uso para crear un diseño de experimento en el que se combinarán los 4 factores de ensayo en base a una matriz, de la cuál luego mediante el software estadístico *MiniTab 17 Software* se determinará el peso de cada factor sobre la propiedad final mediante un estudio ANOVA (*Analysis of Variances* o Análisis de Varianzas).

El diseño de Taguchi será de 4 factores con 3 niveles, y para ello se puede realizar un arreglo de diseño L9 o L27. El primero solo requiere realizar 9 ensayos y no permite estudiar interacciones entre factores, mientras que para el L27 son necesarios 27 pero si permitiría estudiar al menos 1 interacción entre factores.

Así pues, se va a realizar un diseño de experimento L9, ya que la interacción entre factores no es objeto inicial de este proyecto, y el orden de los factores se escogerá en base a la facilidad de ensayo. Esto quiere decir que los factores que suponen un inconveniente mayor modificarlos de un ensayo al siguiente se escogerán antes para que tengan menor variabilidad. La matriz de diseño resultante se puede ver en la Tabla 7. Con la matriz de Taguchi escogida, las interacciones entre factores no se podrán analizar completamente ya que para eso sería necesario realizar la totalidad de ensayos. Sin embargo, permite estudiar el impacto de los factores en el resultado final y poder determinar los menos influyentes.

Tabla 7.- Diseño de experimento Taguchi con arreglo L9

Ensayo	VABB	Trayectoria	Fuerza	Paso lateral
1	0	0	90	0,35
2	0	45	135	0,42
3	0	90	180	0,49
4	50	0	135	0,49
5	50	45	180	0,35
6	50	90	90	0,42
7	100	0	180	0,42
8	100	45	90	0,49
9	100	90	135	0,35

Nótese que indistintamente del orden escogido para los factores, al tratarse de un diseño ortogonal todos tienen la misma frecuencia de aparición. En el arreglo de L9 cada par de factores solamente se repite 1 vez en toda la matriz, por ejemplo, el par de 0 de VABB y 0 de Trayectoria o el par de 90 de Trayectoria y 90 de Fuerza. Si se hubiese escogido un diseño de Taguchi con un arreglo de L27 cada par de factores aparecería 3 veces.

## 4. Metodología

### 4.1. Bruñido

Se va a bruñir la superficie en 9 huellas distintas. La distribución en la probeta, tendrá una disposición de 3x3 y las huellas se numerarán de izquierda a derecha y de arriba abajo. En la Figura 10 se puede observar la distribución y numeración, así como la posición de los ejes de referencia para realizar los ensayos.

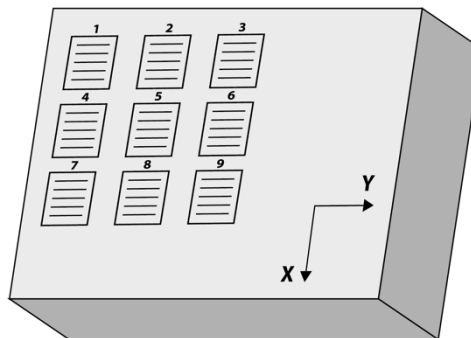


Figura 10. – Distribución de huellas en la probeta y posición de ejes locales

Cada una tendrá una medida de 10x10 mm, con la primera situada a una distancia de (50,100) respecto al vértice superior izquierdo de la probeta, y separadas entre ellas una distancia de 5 mm, de manera que al medir rugosidad y dureza tengamos suficiente espacio en la zona central para poder realizar los ensayos. Este proceso tiene dos fases que se describen a continuación:

- Fase I. Se bruñirá primeramente la superficie, con dirección preferente de bruñido a lo largo del eje Y, con los parámetros de ensayo óptimos establecidos para la primera pasada (Tabla 5), y un proceso sin vibración asistida. Esta fase será común a todas las huellas, de manera que luego podamos analizar cómo afecta sobre cada una de ellas la fase II de bruñido.
- Fase II. Se bruñirá cada huella realizada en la fase I con unos parámetros distintos, establecidos en la Tabla 7.

Para estas dos fases, se ha desarrollado un código de control numérico según normativa ISO para ejecutar en una fresadora *FAGOR CNC 8070* adjunto en el Anexo I. En el mismo, hay diferenciadas las dos fases: la primera parte es un código fijo que ejecuta la primera pasada de bruñido con bola y la segunda parte tiene una serie de variables declaradas que se les asignará el valor correspondiente al ensayo a realizar.

En función de la trayectoria que se deba realizar se ejecutará una parte del código u otra (definidas mediante los códigos PAR, PERP o 45DEG). En el caso de la fuerza, en base a la Figura 3 del apartado 2.3.1 en la que se describe la curva de calibración de la herramienta, obtendremos los tres valores de la coordenada Z en negativo que debemos introducir para ejercer la fuerza necesaria. Para el paso lateral, se define un valor fijo de 0,35 mm y luego una variable que hace de multiplicador de éste.

En la Tabla 8 se puede observar qué valor se debe asignar a cada parámetro incluido al inicio del código en función del parámetro de ensayo. Para ello, hay que modificar ligeramente el código de control numérico antes de realizar la huella.

Tabla 8.- Relación entre factor y variable del código CNC

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>	<b>Parámetro CNC</b>	<b>Valor</b>
Trayectoria	0	P25	2
	45		3
	90		1
Fuerza	90	P2	-0,7
	180		-1,8
	270		-3
Paso lateral	0,35	P4	1
	0,42		1,2
	0,49		1,4

## 4.2. Estudio de la rugosidad

Para el estudio de rugosidad se emplea un rugosímetro de contacto *Mitutoyo Surftest SJ-210*, y la longitud de corte o cut-off la vamos a establecer en  $\lambda_c = 0,25$  mm según la normativa ISO1997. Esta herramienta es capaz de analizar la superficie filtrando a su vez las posibles ondulaciones y estudiando únicamente las irregularidades debidas a la rugosidad superficial.

Para determinar la longitud de corte, hay una norma que reza que cuanto menor sea el valor de la rugosidad, menor debe ser esta longitud. Inicialmente, se desconoce la rugosidad y se determina una longitud de  $\lambda_c = 0,8$  mm ya que la longitud de evaluación sería mayor y, por lo tanto, se abarcará mejor la rugosidad superficial de la huella.

Sin embargo, resultó ser contraproducente tras unos primeros ensayos debido a que la herramienta no filtra bien las pequeñas ondulaciones superficiales al tratarse de una rugosidad superficial baja, dando lugar a valores de rugosidad más elevados e irregulares y comportamientos incoherentes al realizar el análisis ANOVA.

Finalmente, se determina una longitud de corte o cut-off de  $\lambda_c = 0,25$  mm y se realiza de nuevo la medición, cuyos valores de rugosidad inicial pueden observarse en la Tabla 4 del apartado 3.1.

Para poder estudiar la rugosidad superficial de la manera más completa posible, se van a realizar 10 mediciones a lo largo del eje X y otras 10 a lo largo del eje Y en cada una de las huellas, en distintos puntos de la misma para poder abarcar un 80% aproximadamente de la superficie bruñida, y se anotaran en una tabla los valores de  $R_a$  y  $R_t$  correspondientes. La Figura 11 muestra el esquema de ésta medición:

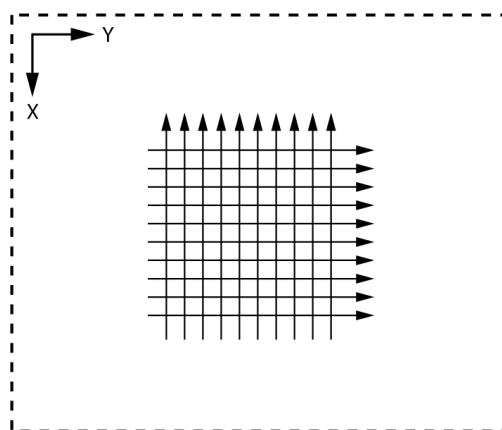


Figura 11. – Esquema de líneas de medición con el rugosímetro

Para eliminar datos atípicos de la muestra, se aplicará el criterio de Chauvenet. Éste se basa en que, con un 95% de confianza, los valores de una muestra pueden ser validados siempre que estén contenidos en un intervalo de dos veces su desviación típica. Por ello, a medida que se van acumulando valores de rugosidad, se recalculará el intervalo asociado al criterio de Chauvenet para descartar los valores que se encuentren fuera del rango en función de la desviación estándar de la muestra.

### 4.3. Estudio de la dureza superficial

Para el estudio de la dureza se va a emplear un durómetro *Buehler*, el cual incorpora un módulo de control dónde se podrá visualizar digitalmente las dos medidas de la huella provocada por el indentador y se controla el inicio de ensayo y se establece la distancia cero de las líneas de visualización.

Antes de iniciar los ensayos de dureza, se va a realizar una calibración de la apreciación visual a la hora de medir la distancia de una huella. Para ello, siguiendo unos protocolos establecidos, se medirá progresivamente la distancia en un patrón de longitud, con una regla serigrafiada en el centro en la que cada división está a una distancia de 10  $\mu\text{m}$ , desde 10 hasta 100.

Mediante regresión lineal se obtendrán los parámetros de la recta  $y = mx + b$  que posteriormente se utilizarán como factor corrector de medida en los ensayos de dureza. Éste proceso se realizará con el aumento de 100x, el mismo que en los ensayos de dureza en la probeta.

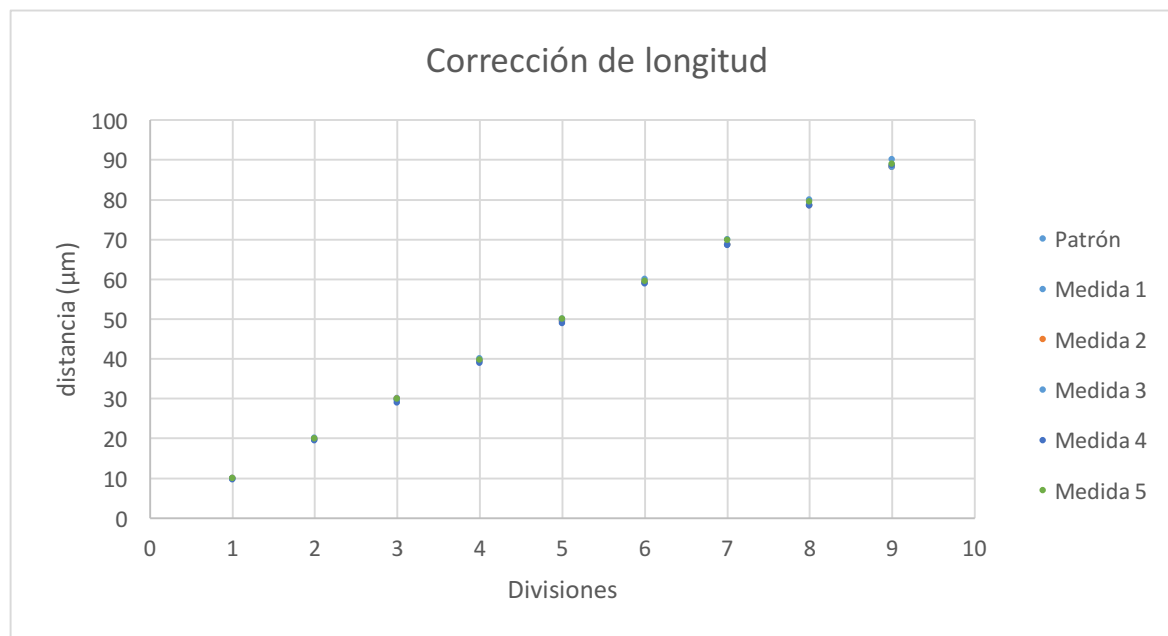


Figura 12. – Gráfica de calibración visual en el patrón de longitud con aumento 100x

Tabla 9.- Parámetros de regresión lineal de la calibración visual con aumento 100x

	Valor	Error estándar
m	1,01776	0,00194
b	-0,12766	0,10748
$r^2$	0,99984	
Estimación parámetro y		0,33012

En la Figura 12 y la Tabla 9 se puede observar que las mediciones presentan una correlación muy elevada ( $r^2 \approx 1$ ), comportándose prácticamente como una recta. Por tanto, la corrección y sus parámetros son válidos y aplicables a los ensayos de dureza. Los valores de ésta medición pueden encontrarse en la Tabla 17 del Anexo III. Tablas de resultados de calibración de dureza HV.

Una vez hecha la corrección de medida, se realizarán 10 indentaciones con 500 gramos de peso sobre una muestra de material de una dureza Vickers conocida de 700 HV. Con ello se comprobará si la corrección anterior es correcta antes de iniciar ensayos en un material de dureza desconocida. La elección del peso en este punto es arbitraria y servirá para determinar si es aplicable a los ensayos de dureza sobre la probeta.

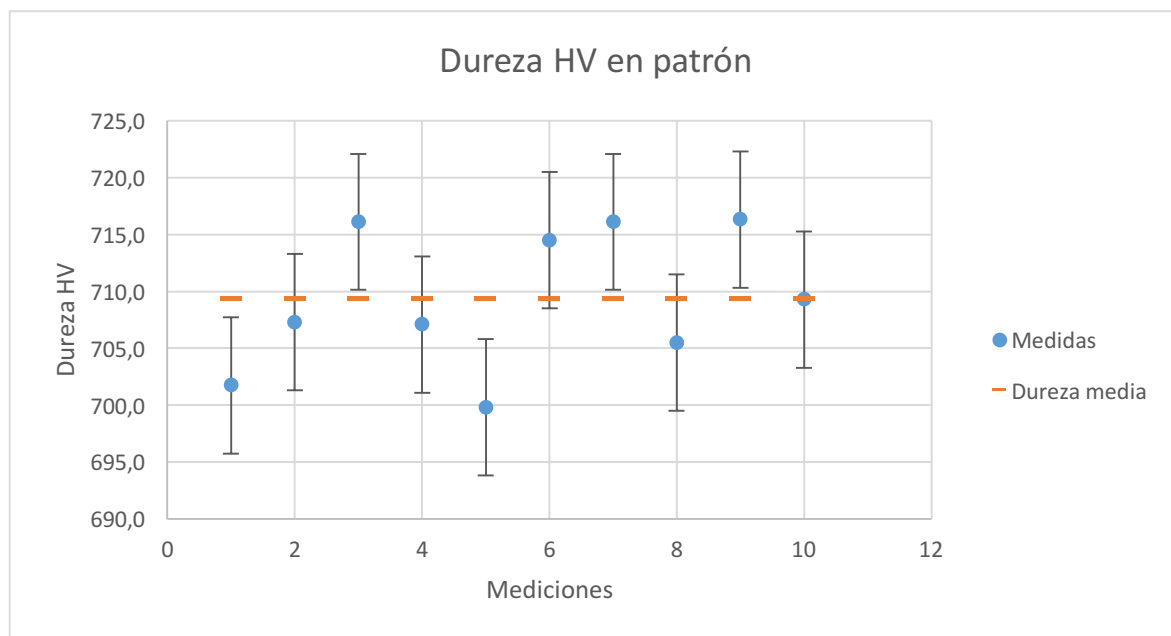


Figura 13. – Mediciones de dureza HV en patrón de dureza de 700 HV

Tabla 10.- Dureza media experimental en patrón de dureza de 700 HV

Dureza HV	Error
709,4	12,0

En la Figura 13 y Tabla 10 están representadas las 10 indentaciones y el valor de la dureza media. A pesar de obtener una dureza media por encima de los 700 HV teóricos de la probeta, se observa una tendencia regular en las medidas, indicio de que no hay una depreciación visual progresiva de las medidas conforme avanza el ensayo. Para consultar los valores de este ensayo, consultar la Tabla 18 del Anexo III. Tablas de resultados de calibración de dureza HV

Viendo que con 500 gramos se obtienen medidas bastante precisas, se opta por realizar los ensayos en la probeta con este peso. Cómo se demostrará más adelante, los resultados obtenidos con este peso llevaron a realizar ensayos adicionales con un peso de 50 gramos para poder evaluar mejor los efectos del bruñido sobre la superficie.

A diferencia de la metodología seguida en el estudio de rugosidad, no se harán medidas en ambos ejes, sino que se establecerá una matriz de medición con unas características concretas, a fin de poder estudiar las posibles diferencias de dureza en los picos y en los valles generados al paso de la bola.

Sabiendo que el paso lateral inicial es de 0,35 mm, se plantearán 3 líneas de medición separadas entre sí 0,17 mm para abarcar un ancho de pasada completo, en un punto central aproximado de la huella y realizando 8 indentaciones en cada línea, con una separación entre ellas de 0,25 mm. Aunque con este método no hay la certeza de haber iniciado las mediciones en un pico o en un valle, lo que sí es seguro es que se medirá 2 veces en puntos situados a la misma altura y entre medias uno situado a distinta altura (bien superior si es un pico o inferior si es un valle). En la Figura 14 se puede ver una representación de la matriz de mediciones que se va a realizar sobre cada una de las huellas.

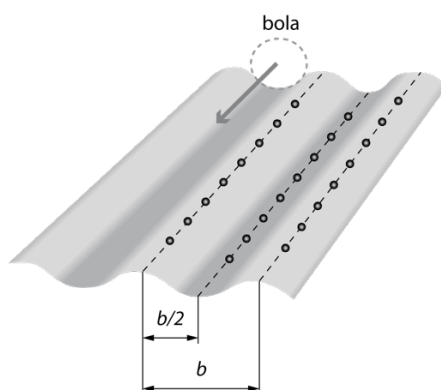


Figura 14. – Matriz de indentaciones sobre la superficie



En pos de agilizar el proceso de medición, y para asegurar que la matriz de medición se cumple, se situará el indentador en la zona central de la huella y se pondrán los 2 micrómetros de desplazamiento X e Y de la base móvil a 0. A partir de la primera indentación, se irá desplazando progresivamente el micrómetro del eje Y en incrementos de 0,25 mm hasta realizar 8 marcas. A continuación, se desplazará el micrómetro del eje X 0,17 mm, se hará una nueva indentación y se irá retrocediendo 0,25 mm con el micrómetro del eje Y hasta realizar 7 más. Por último, el micrómetro del eje X se desplazará 0,17 mm más y se realizarán las últimas 8 indentaciones. En la Figura 15 se puede ver un esquema gráfico de la secuencia de indentaciones.

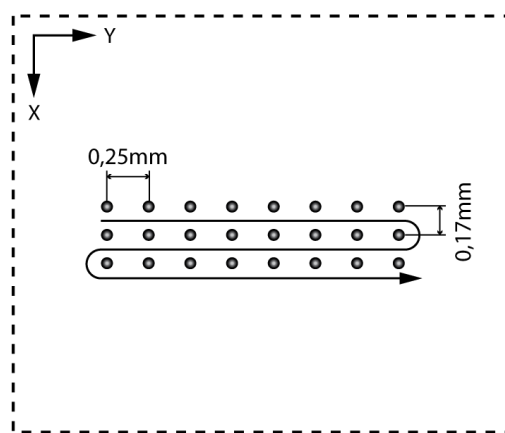


Figura 15. – Secuencia de indentaciones en cada huella

Tras haber realizado las 24 indentaciones, se irá midiendo cada huella desplazando en sentido contrario los micrómetros, anotando los valores en una tabla y descartando los valores atípicos mediante un criterio de desviación estándar de la muestra. Cada línea de medición se analizará por separado para tener una dureza media en cada una y ver si hay diferencias entre ellas, de lo contrario se podrían descartar valores atípicos de una línea a la otra que falsearían las posibles diferencias de dureza entre una línea y otra.



## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Rugosidad. Análisis gráfico

En la Figura 16 se puede observar el resultado tras realizar las dos fases de bruñido. De fondo, se pueden apreciar las marcas superficiales del mecanizado previo, realizado en el eje Y. En la parte inferior de la imagen, las líneas patrón para realizar un calibrado del rugosímetro antes de medir en las huellas.

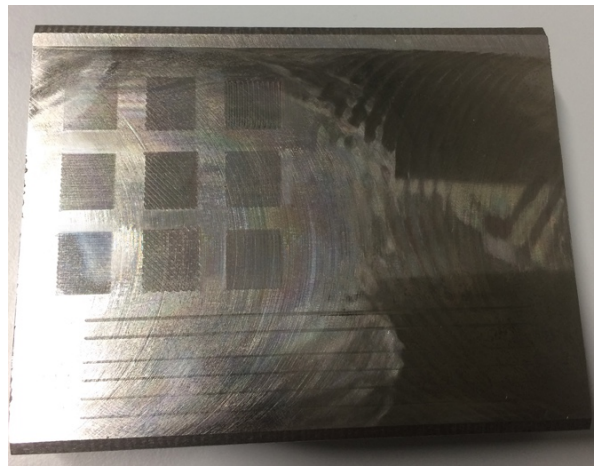
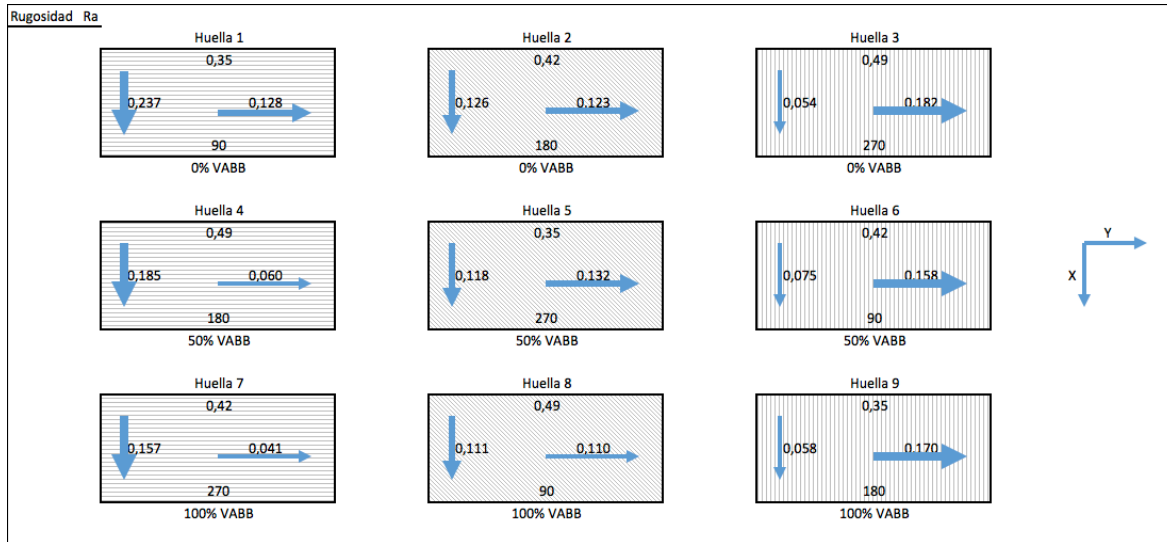
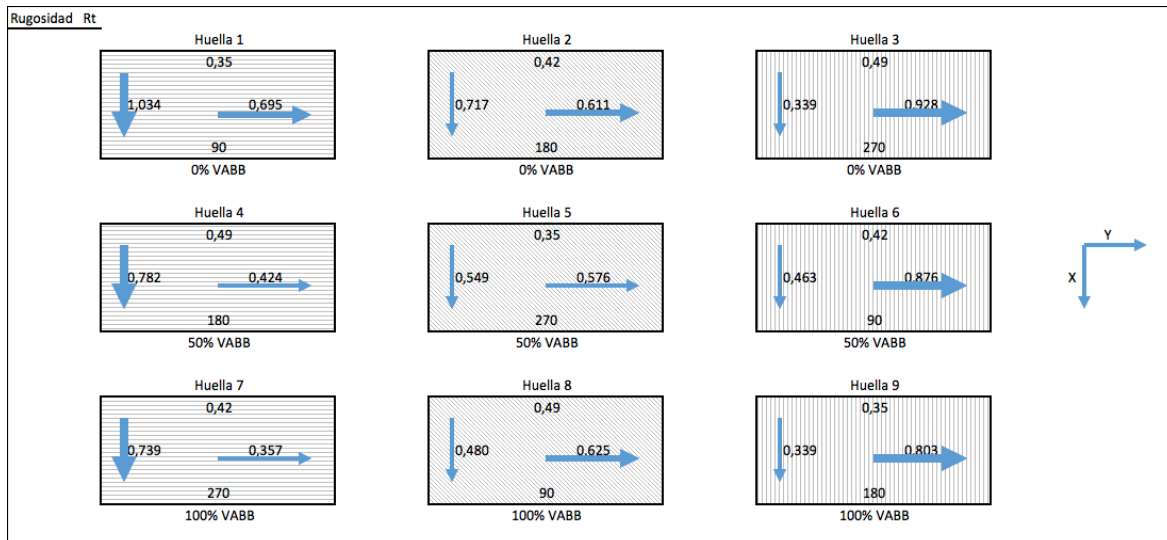


Figura 16. – Probeta con las dos fases de bruñido completas

Tras realizar los primeros análisis de rugosidad, previos al estudio estadístico de los datos, en la Figura 17 y Figura 18 se puede ver de manera gráfica una representación de los resultados y la tendencia de los valores según las condiciones de ensayo.

De manera visual, hay tres tipos de grosor de flecha, la mayor representa las tres rugosidades más altas y la más delgada las tres menores. Cada huella está identificada con su número y sus parámetros y, de fondo, está representada la dirección preferente de bruñido de la segunda pasada.

Figura 17. – Representación gráfica de los resultados de  $R_a$ Figura 18. – Representación gráfica de los resultados de  $R_t$ 

Se puede apreciar que las rugosidades medidas a lo largo del eje preferente, las  $R_{ay}$  en las huellas 1, 4 y 7 o las  $R_{ax}$  en las huellas 3, 6 y 9, presentan los valores más bajos. Por otro lado, las medidas a lo largo del eje perpendicular, es dónde presenta los valores de rugosidad más altos.

En el caso de las huellas 2, 5 y 7, con la trayectoria a 45 grados, la rugosidad, como se estudiará luego, es la que presenta menor variabilidad entre ambos ejes. Todos los valores obtenidos del ensayo se encuentran en las tablas del Anexo II. Tablas de resultados de rugosidad.

## 5.2. Rugosidad. Análisis ANOVA

Los resultados anteriores se introducirán en el software MiniTab para realizar el análisis estadístico y poder observar cómo afectan cada uno de los factores de ensayo sobre la rugosidad.

Se obtendrán las gráficas de efectos principales para ambas rugosidades, media y total, en cada uno de los ejes X e Y. También se estudiará la relación entre la rugosidad del eje X respecto al Y, que se representará mediante  $\rho_a$  y  $\rho_t$  para la relación de rugosidad media y total respectivamente.

Además, para determinar la importancia o el peso de cada uno de los factores, se realizarán gráficas S/N (Signal to Noise). En ellas, se representa el valor de la relación señal/ruido, y la importancia es mayor cuanto mayor sea el valor. El ruido hace referencia a los valores atípicos que pueden distorsionar o corromper la señal, por lo tanto, un valor mayor denota una señal más potente y con menor variabilidad, y por ende influencia más robusta sobre el resultado final.

Para el cálculo de estas gráficas estaremos en el escenario de “Más pequeño es mejor”, ya que la intención es minimizar la respuesta, es decir, la rugosidad. En el arreglo de Taguchi, para este caso, se utiliza la ecuación (4) para el cálculo de la relación S/N:

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left( \sum \frac{Y^2}{n} \right) \quad (4)$$

A continuación, se encuentran todas las gráficas obtenidas con el análisis ANOVA agrupadas por eje (X, Y y  $\rho$ ) y, dentro de cada una, por rugosidad. A continuación de cada gráfica se encuentra su gráfica de relación S/N para comprobar la robustez del resultado.

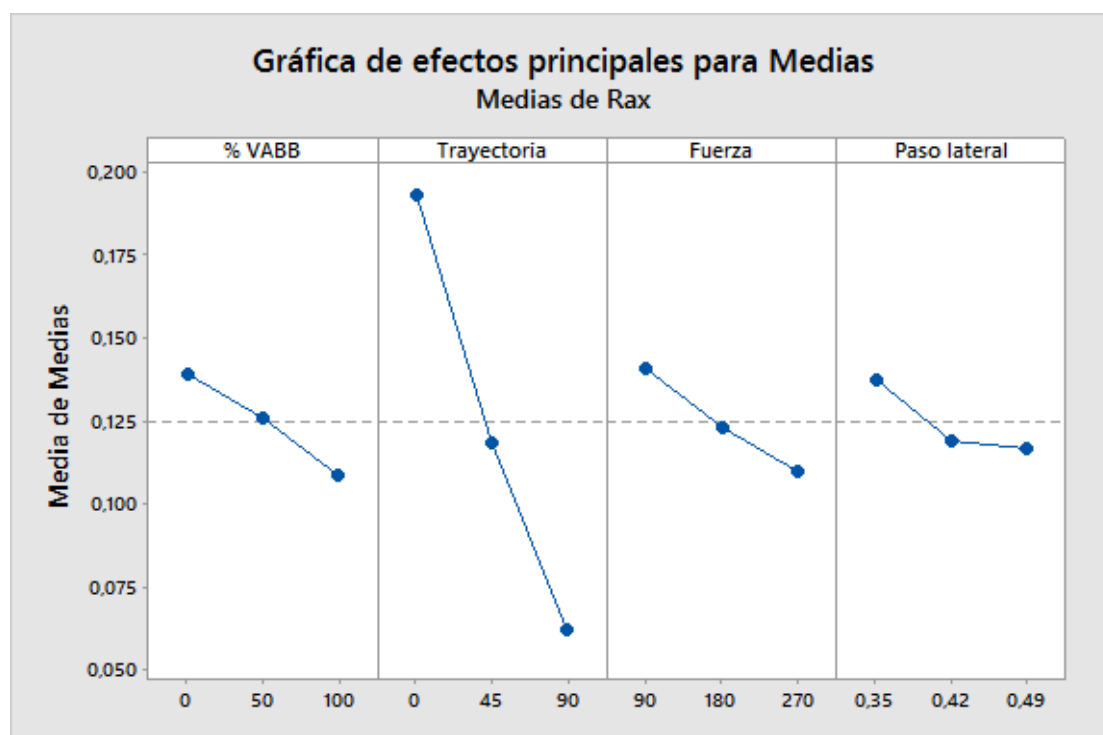


Figura 19. – Efectos principales sobre rugosidad media  $R_a$  en eje X

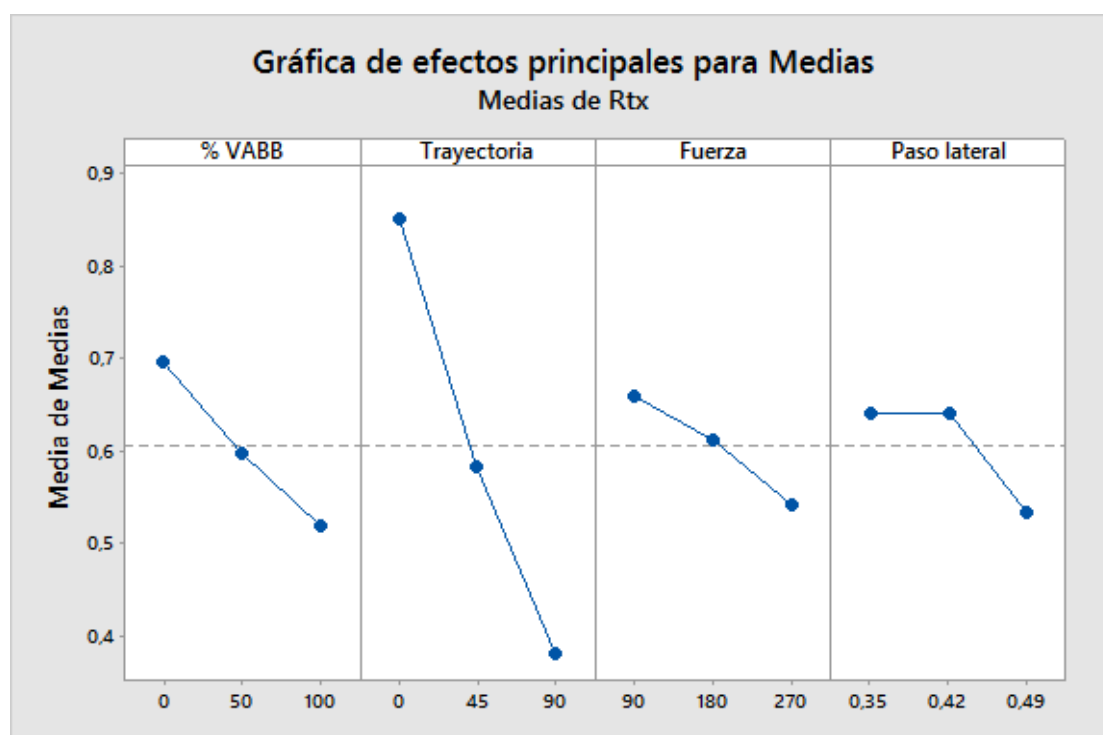


Figura 20. – Efectos principales sobre rugosidad total  $R_t$  en eje X

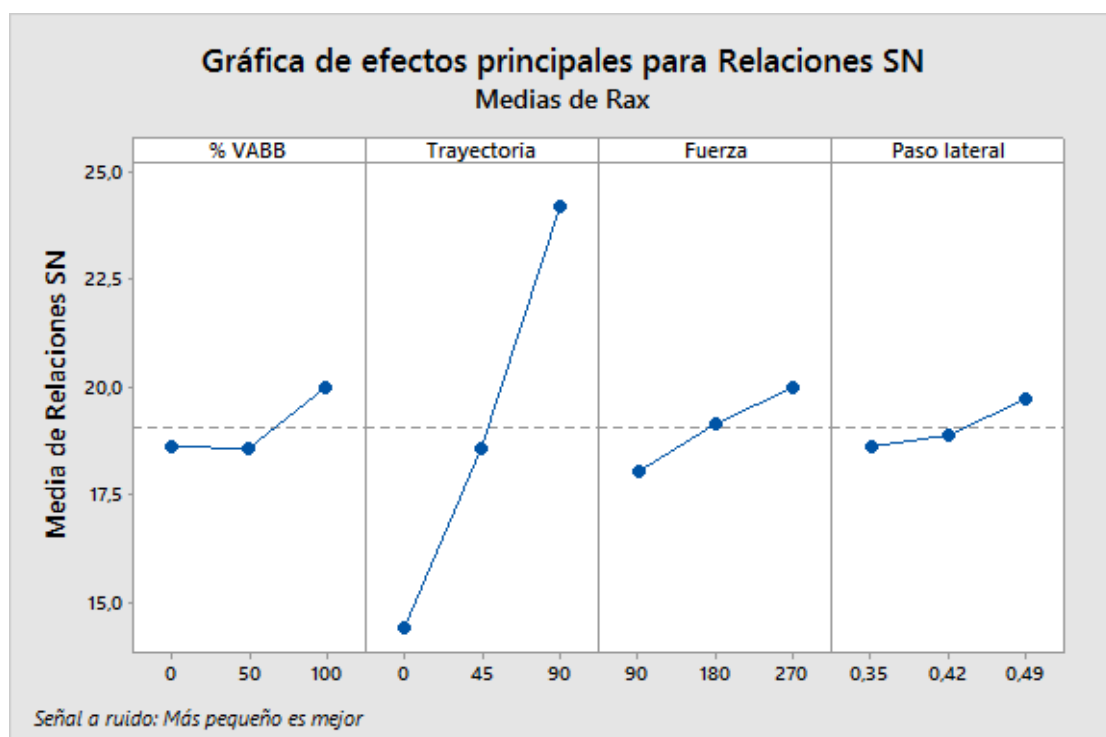


Figura 21. – Relación S/N de rugosidad media  $R_a$  en eje X

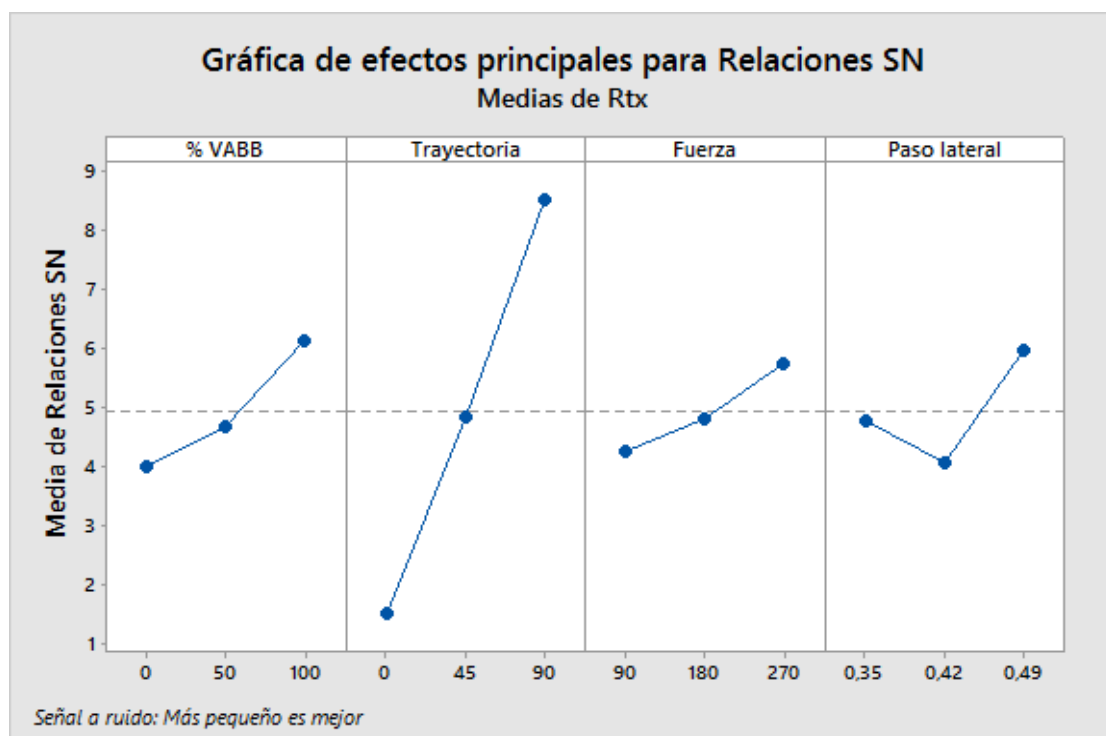


Figura 22. – Relación S/N de rugosidad total  $R_t$  en eje X

En la Figura 19 y Figura 20 se puede observar el análisis para rugosidad  $R_a$  y  $R_t$  en el eje X. Éste eje es perpendicular al eje preferente del bruñido (tomado como referencia el eje Y), por lo tanto la trayectoria a 90 es la que ofrece menor rugosidad sobre el eje X, ya que es la que se ha bruñido sobre el eje X en la segunda pasada.

En las gráficas se aprecia como la influencia del factor de trayectoria es superior al resto, los cuáles sí que tienen una tendencia clara en reducir rugosidad a medida que aumenta su valor, pero no de manera tan drástica. El comportamiento, tanto de la  $R_a$  como de  $R_t$ , son prácticamente idénticos, a excepción del factor paso lateral, si bien la tendencia es similar. En cualquier caso, no es un comportamiento demasiado anormal y también podría ser debido a pequeñas variaciones en la medición, con lo que se puede concluir que al incrementar el paso lateral también se reduce ligeramente la rugosidad. La Figura 21 y la Figura 22 tienen el comportamiento esperado y demuestran la robustez del ensayo y la importancia del factor de trayectoria en el resultado final.

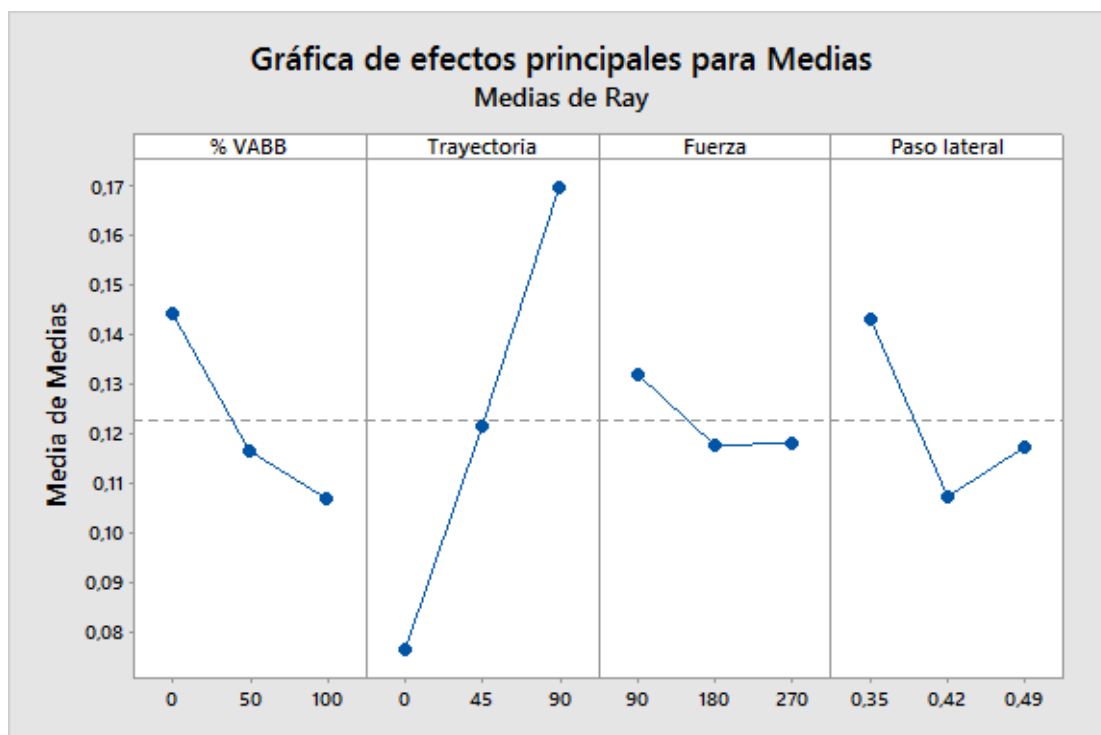


Figura 23. – Efectos principales sobre rugosidad media  $R_a$  en eje Y



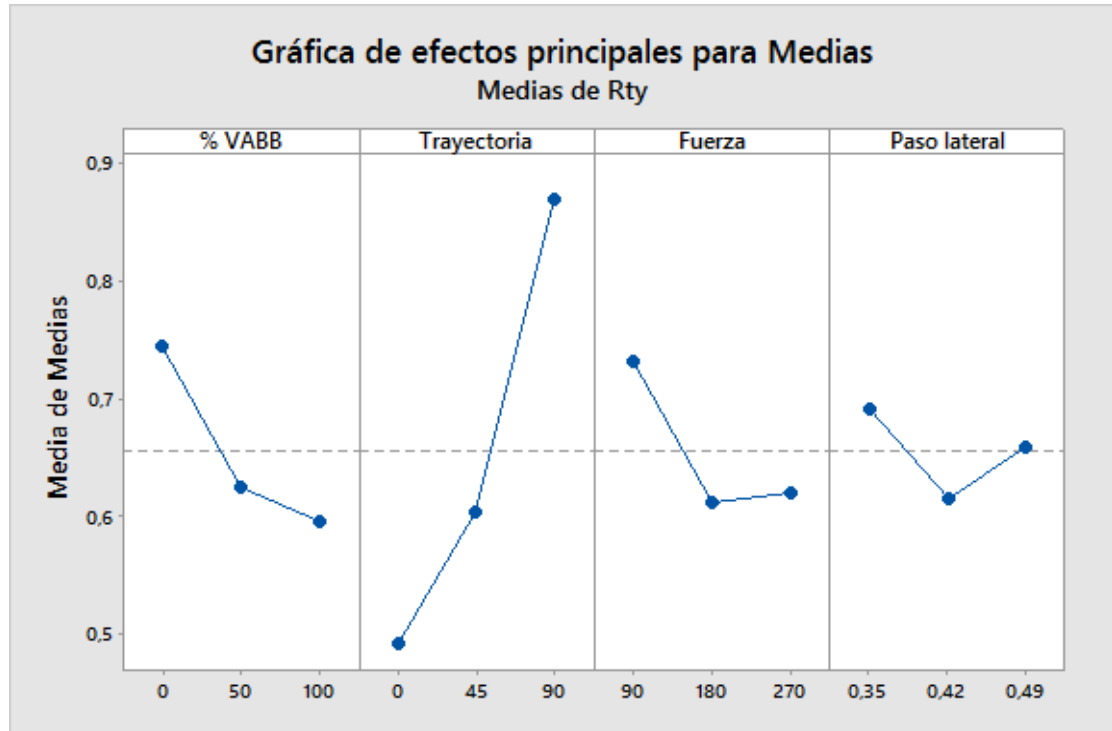
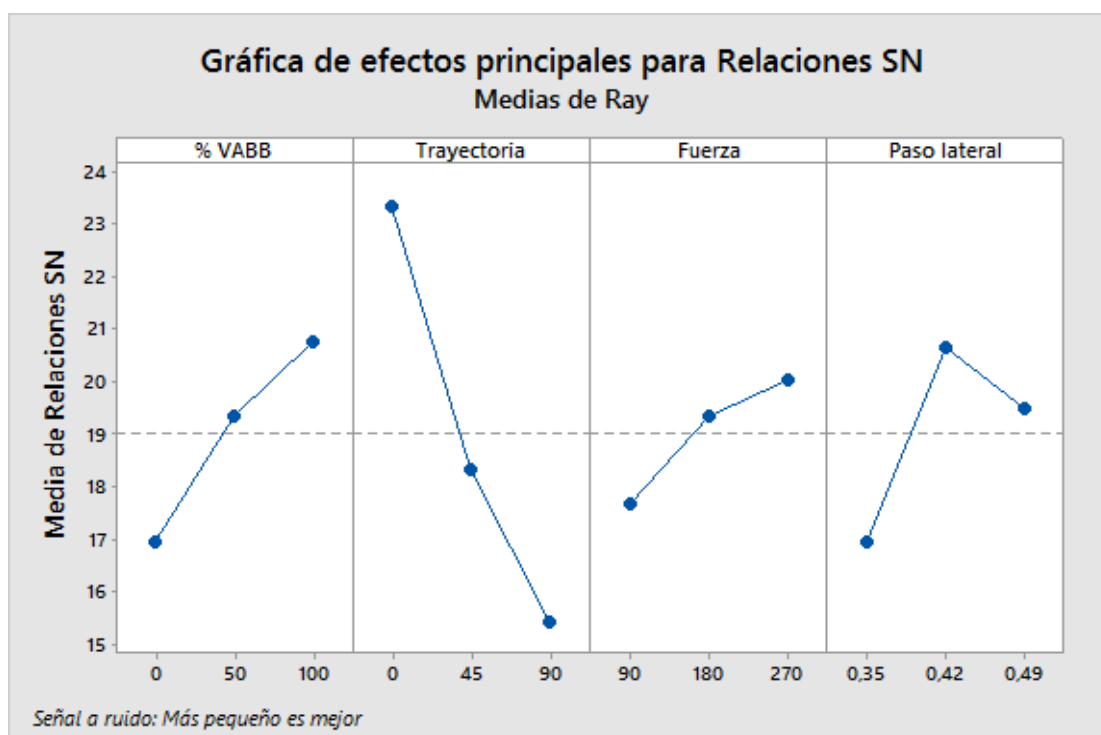
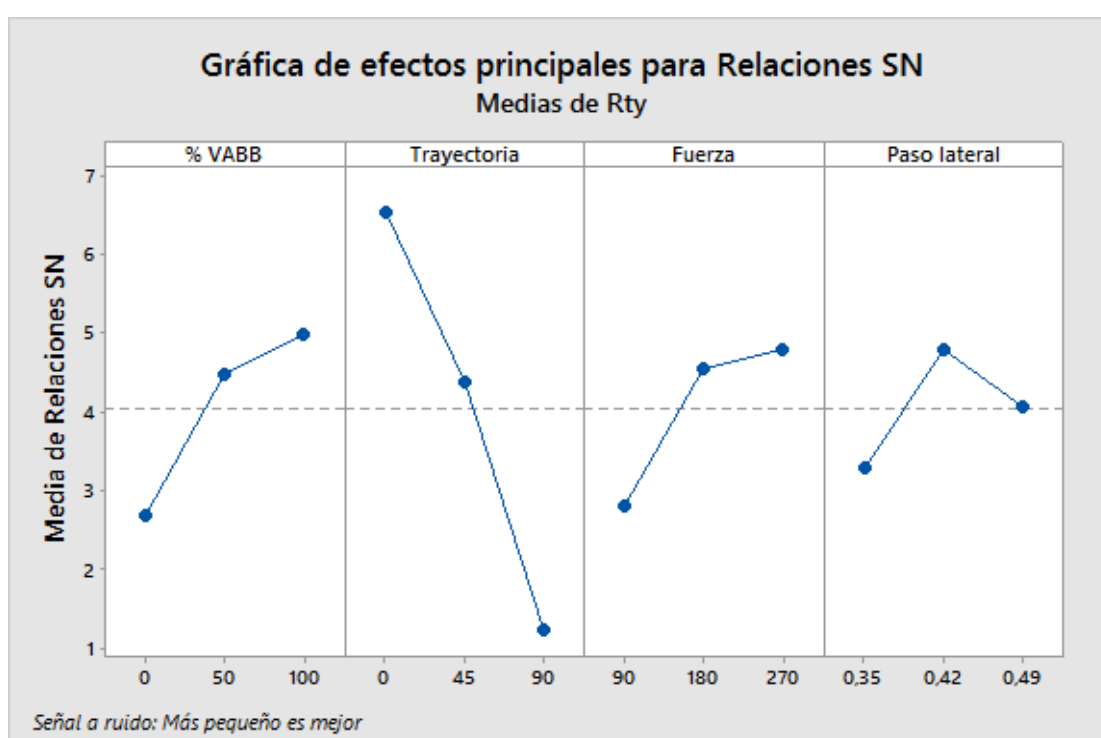


Figura 24. – Efectos principales sobre rugosidad total  $R_t$  en eje Y

En la Figura 23 y Figura 24, que representan los efectos principales de cada factor sobre la rugosidad en el eje Y, se puede observar un comportamiento muy similar en cuanto al factor %VABB. La fuerza, por el contrario, denota un incremento de rugosidad al utilizar 270 N. Como cabía esperar, el comportamiento de la trayectoria es completamente inverso al anterior en el eje X puesto que a mayor incremento de grados más nos desviamos del eje preferente de bruñido. Sin embargo, el comportamiento del factor paso lateral es distinto al del eje X, ya que en éste se observa que, tanto en la rugosidad media como la total, muestran un incremento de rugosidad al pasar de 0,42mm a 0,49mm.

Ésta diferencia puede ser debida a que, teniendo en cuenta que la primera pasada del bruñido también se hizo sobre el eje Y con un paso lateral de 0,35mm, el utilizar el mismo paso hace incrementar la longitud entre pico y valle. Al utilizar un paso lateral ligeramente mayor, se conseguiría crear un perfil más regular al pasar la bola por encima de lo que en la primera pasada era el inicio de un pico e ir arrastrando ese material poco a poco. En exceso, como sería el paso lateral de 0,49 mm, lo que se consigue es el efecto contrario ya que estaríamos desplazados un 150% respecto al primer paso, y en lugar de ir arrastrando material lo que sucedería es que se generarían nuevos picos que incrementarían la rugosidad.

Figura 25. – Relación S/N de rugosidad media  $R_a$  en eje YFigura 26. – Relación S/N de rugosidad total  $R_t$  en eje Y

La Figura 25 y Figura 26, con comportamientos completamente inversos, demuestran la robustez del ensayo, y confirmando que de nuevo la trayectoria tiene el peso principal en el resultado final. El resto de factores, aunque tienen menor peso, sí que se observa que son más influyentes que en el caso de la rugosidad en el eje X, debido a que la primera pasada de bruñido ha sido a lo largo del eje Y y, por consiguiente, se puede entender que a lo largo de ese eje las mediciones son más sensibles a otros factores que no en el eje X, que ha sido bruñido en menor medida.

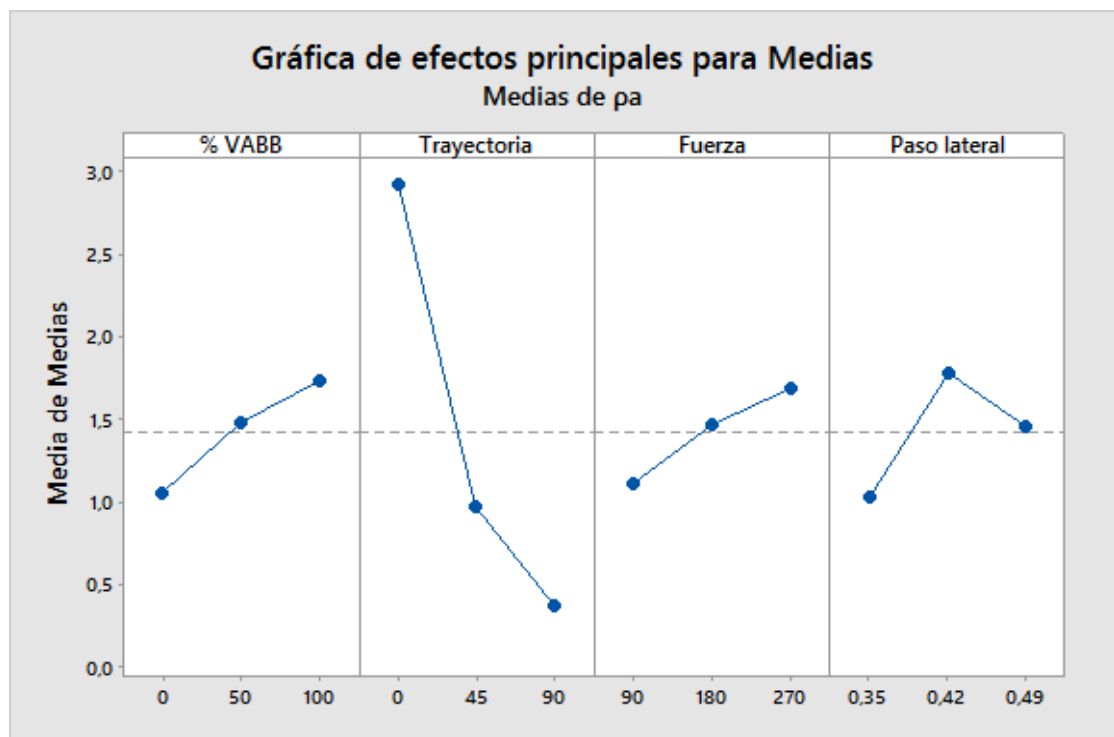
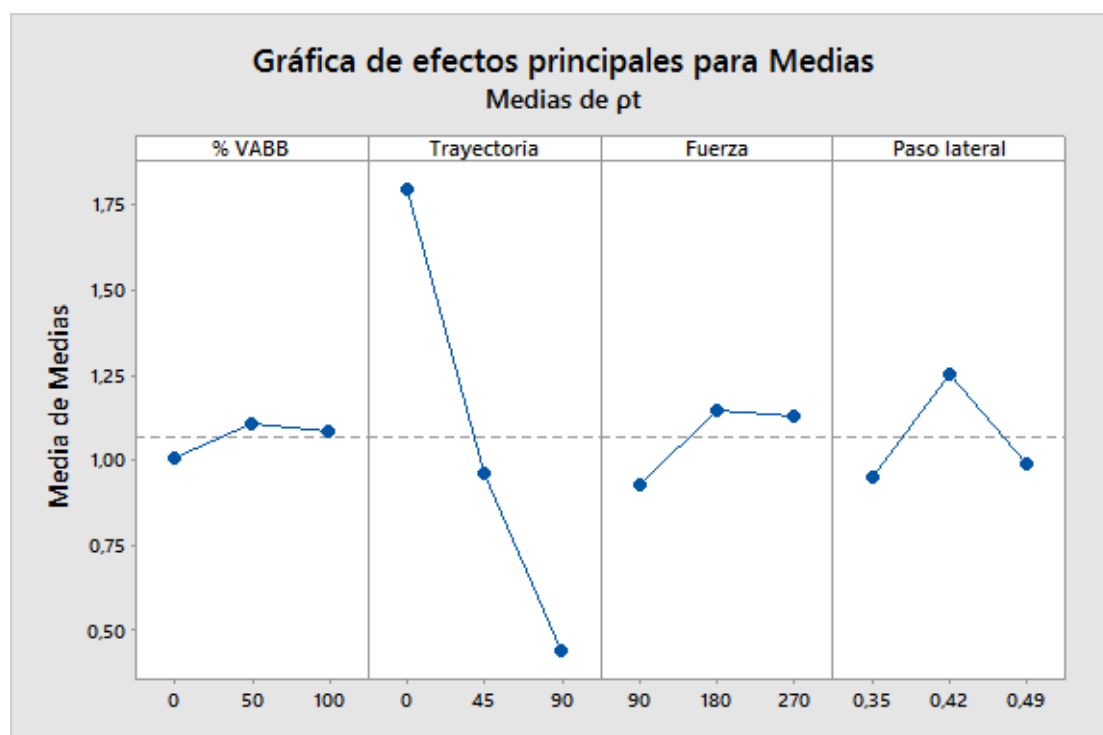
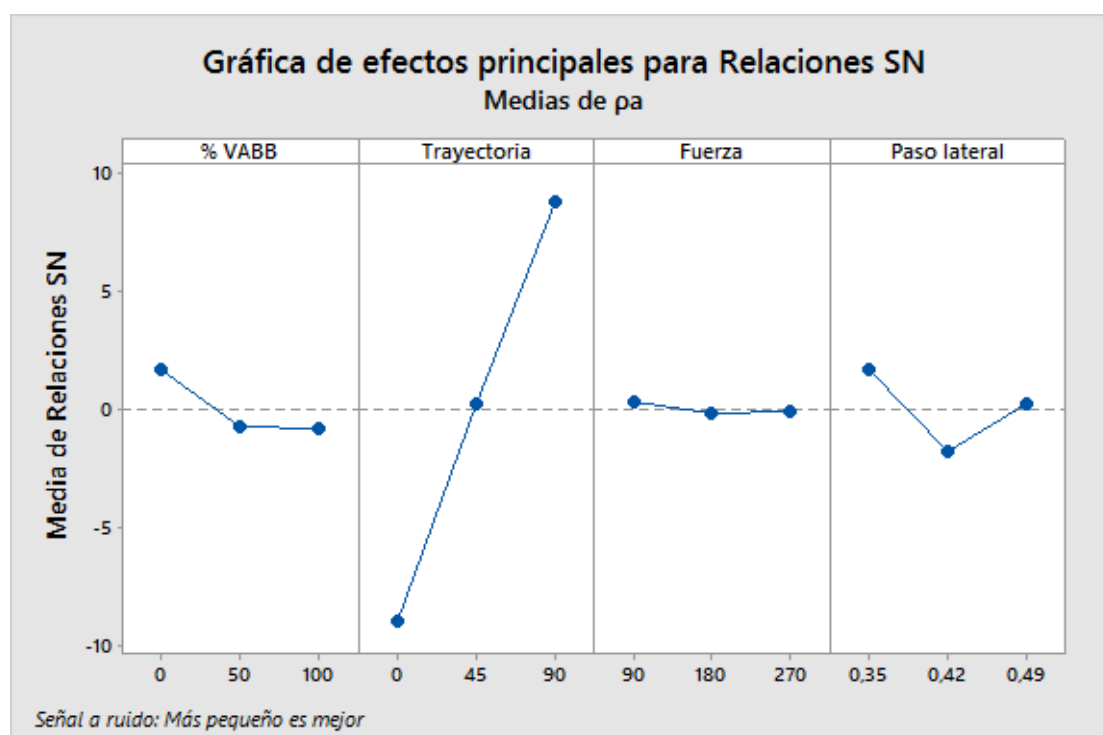


Figura 27. – Efectos principales sobre ratio  $p_a$

Figura 28. – Efectos principales sobre ratio  $\rho_t$ Figura 29. – Relación S/N de ratio  $\rho_a$

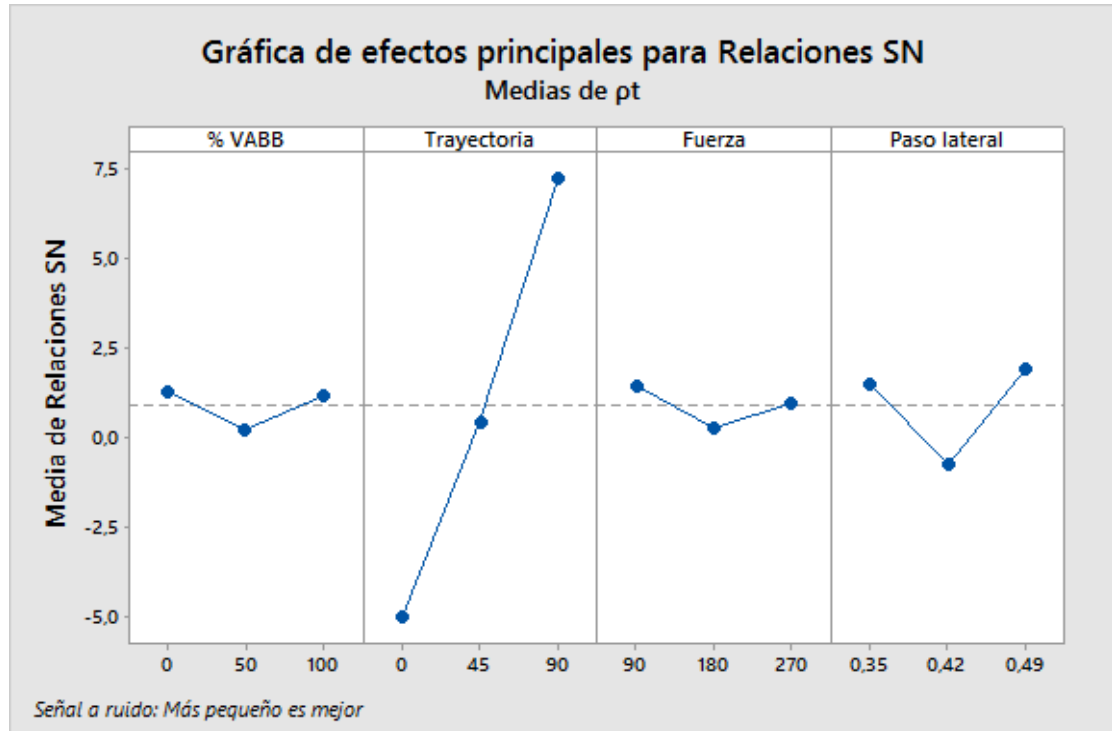


Figura 30. – Relación S/N de ratio  $p_t$

La Figura 27 y Figura 28, con sus gráficos Signal to Noise representados en la Figura 29 y Figura 30, representan algo distinto a los anteriores. En estos gráficos, valores cercanos a 1 denotan un comportamiento de rugosidad idéntico tanto en un eje como en el otro. De nuevo, el factor trayectoria es el más influyente, y para conseguir un resultado equilibrado entre ejes se ha de optar por una trayectoria a 45 grados. La relación de rugosidades medias es más sensible a cambios de valor en los factores, y todo lo que sea superior a los valores mínimos hace decantar ligeramente la rugosidad hacia el eje Y, que ya hemos dicho anteriormente que es más sensible al haberse bruñido inicialmente sobre este eje también. En el caso de la relación de rugosidades totales, se aprecia que tanto con un paso lateral mínimo como máximo, el comportamiento en ambos ejes es similar, mientras que para el factor de %VABB la variación es mínima.

Por último, para poder ver la mejora respecto a la superficie inicial, se encuentra a continuación la Tabla 11, en la que se ha escogido los valores más óptimos para cada rugosidad en cada eje y se ha comparado el porcentaje de mejora respecto al inicial.

En el caso de la rugosidad en el eje Y, se han escogido los valores de la huella 7 ya que es la que aglomera los mayores valores de los factores que se ha visto que influyen (100 % VABB, 270 N y 0,42 mm). Para la rugosidad en el eje X, se han escogido los de la huella 9. Aunque ésta tenga un paso lateral de 0,35 mm y una fuerza de 180 N, se observa en la Figura 20 que es más influyente el % VABB y la huella 3, que tiene un paso lateral de 0,49 mm y 270 N, no tiene vibración asistida y ofrece resultados peores de rugosidad. Por último, ya que la superficie inicial tiene una rugosidad regular en ambos ejes, se compararán los datos con los de la huella 5, que es la que ofrece los valores más regulares tanto en rugosidad media como total.

Tabla 11.- Comparativa de rugosidades iniciales y finales

Rugosidad	Inicial	Huella 7		Huella 9		Huella 5	
		Valor	Mejora	Valor	Mejora	Valor	Mejora
$R_{ax} (\mu m)$	0,216	0,157	27 %	0,058	73 %	0,118	45 %
$R_{ay} (\mu m)$	0,328	0,041	88 %	0,170	48 %	0,132	60 %
Módulo $R_a (\mu m)$	0,393	0,162	59 %	0,180	54 %	0,177	55 %
$R_{tx} (\mu m)$	1,111	0,739	33 %	0,339	69 %	0,549	51 %
$R_{ty} (\mu m)$	1,522	0,357	77 %	0,803	47 %	0,576	62 %
Módulo $R_t (\mu m)$	1,884	0,821	56 %	0,872	54 %	0,796	58 %

Se puede observar que, tanto la huella 7 como la huella 9, ofrecen unas mejoras muy altas de rugosidad respecto la inicial a lo largo de un eje preferente. Viendo que la huella 7 ofrece en general mejor resultado que la huella 9, y teniendo en cuenta que ésta se ha realizado con un paso lateral mayor (0,42 mm frente a 0,35 mm) pero también con una fuerza mayor (270 N frente a 180 N) se puede deducir que, entre ambos factores, prevalece una mayor fuerza en pos de obtener mejor resultado final, del orden del 88% en  $R_a$  y 77 % en  $R_t$ .

Por otro lado, se observa que la huella 5, con una trayectoria de 45%, es la que presenta una mejora más equilibrada en ambos ejes, del orden del 56% aproximadamente en  $R_a$  y  $R_t$ . En todos los casos, al calcular el módulo entre ambos ejes, la mejora de rugosidad está en torno al 55%.

### 5.3. Dureza HV500. Análisis gráfico

En la Tabla 12 se puede observar los resultados de dureza obtenidos en cada una de las huellas y en cada una de sus líneas de medición. La numeración de las líneas de medición es únicamente por motivos gráficos, una manera de poder representar correctamente los puntos en los gráficos.

En la tabla se puede observar tanto el valor de dureza como su error basado en la desviación estándar, el número de medidas correctas y la media ponderada de la huella en base a las 3 líneas de medición.

Tabla 12.- Resultados de dureza con 500 gramos de peso

		d (μm)	HV	Error	Mínimo	Máximo	Medidas	Media
1	1	53,21	328	6	321	334	7	323
	2	54,30	314	3	311	318	7	
	3	53,39	326	8	318	334	8	
2	4	53,95	319	7	312	326	8	310
	5	55,49	301	7	295	308	8	
	6	54,63	311	6	305	317	8	
3	7	55,27	304	10	294	314	8	303
	8	55,55	301	5	296	306	8	
	9	55,34	303	5	298	308	7	
4	12	52,53	337	9	327	346	8	329
	13	53,85	320	11	309	331	5	
	14	52,92	331	8	324	339	7	
5	15	50,93	358	9	349	366	7	363
	16	50,04	370	5	365	376	6	
	17	50,75	360	5	355	365	6	
6	18	55,01	307	6	301	312	8	304
	19	55,07	306	6	300	311	7	
	20	55,60	300	6	294	306	8	
7	23	49,15	384	7	378	391	8	388
	24	48,28	398	10	389	408	6	
	25	49,25	383	14	369	397	6	
8	26	53,12	329	4	325	332	7	330
	27	52,37	338	7	331	345	7	
	28	53,55	324	9	315	333	8	
9	29	51,68	349	4	346	353	7	358
	30	51,42	351	7	344	358	7	
	31	50,02	373	9	364	381	8	

Se puede observar que, en todas las huellas, el comportamiento que tiene la dureza es el esperado antes de obtener resultados, es decir, las líneas 1 y 3 de medición presentan un valor similar de dureza y la línea 2 es ligeramente superior o inferior. Así pues, se puede asegurar que la matriz diseñada es válida y que existen pequeñas diferencias de dureza entre pico y valle debidas a la acumulación de tensión residual en cada punto.

Puesto que la dureza no está determinada de manera tan clara por un factor como pasa con la rugosidad, en lugar de hacer una representación gráfica con flechas de cada huella se representará cada huella, con sus 3 líneas de medición, agrupadas de menor a mayor valor para cada uno de los factores reordenando las huellas para que estén juntas.

En los gráficos está representado cada uno de los valores con sus barras de error, y una línea discontinua que representa el valor promedio de las 3 huellas que comparten el mismo valor del factor según el cual están agrupadas.

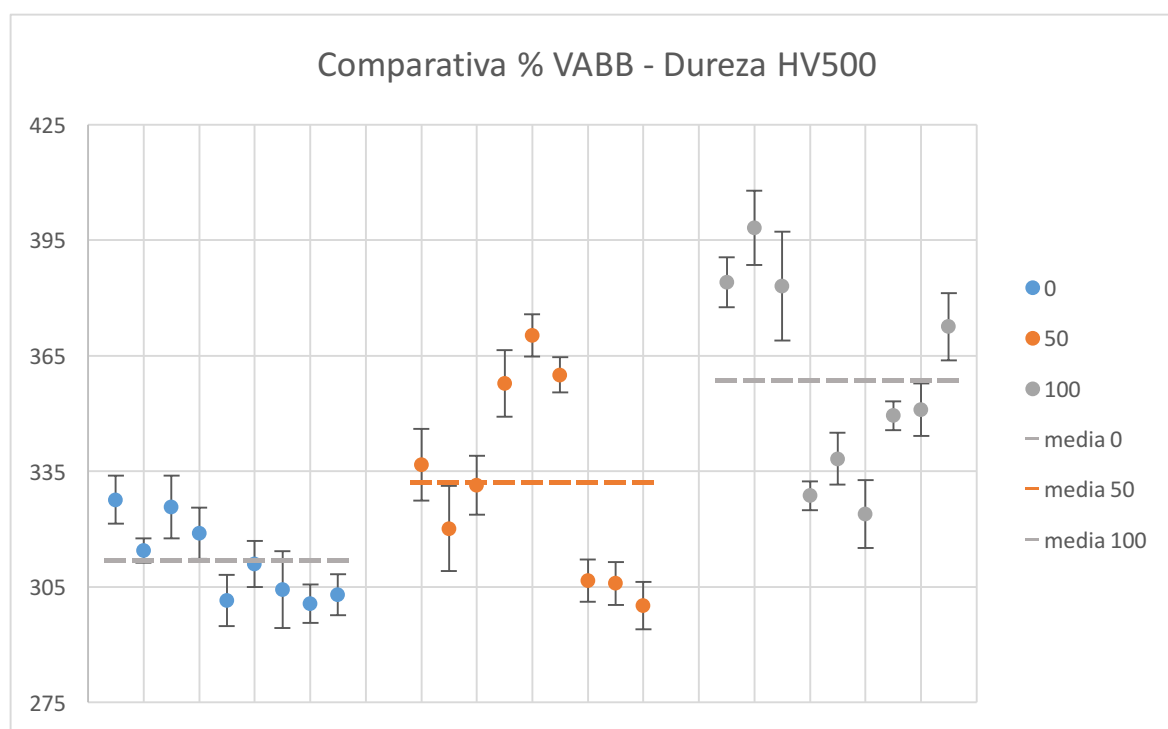


Figura 31. – HV500 según % VABB. Orden de huellas 1-2-3-4-5-6-7-8-9



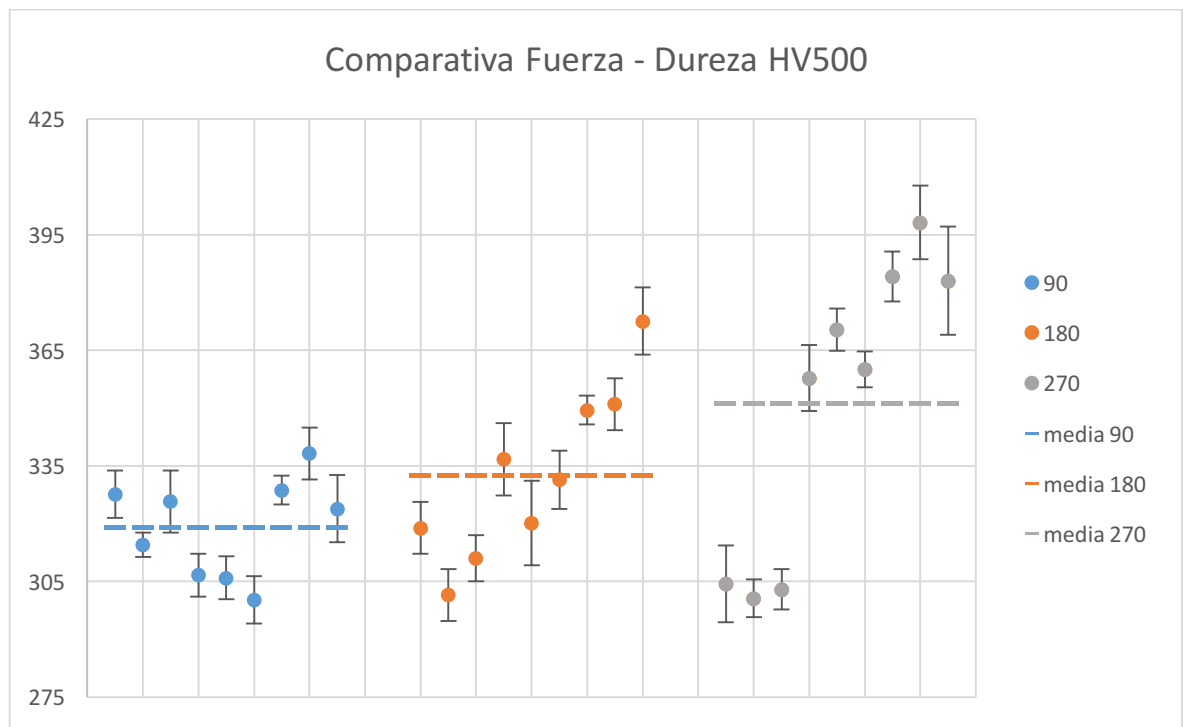


Figura 32. – Dureza HV500 según Fuerza. Orden de huellas 1-6-8-2-4-9-3-5-7

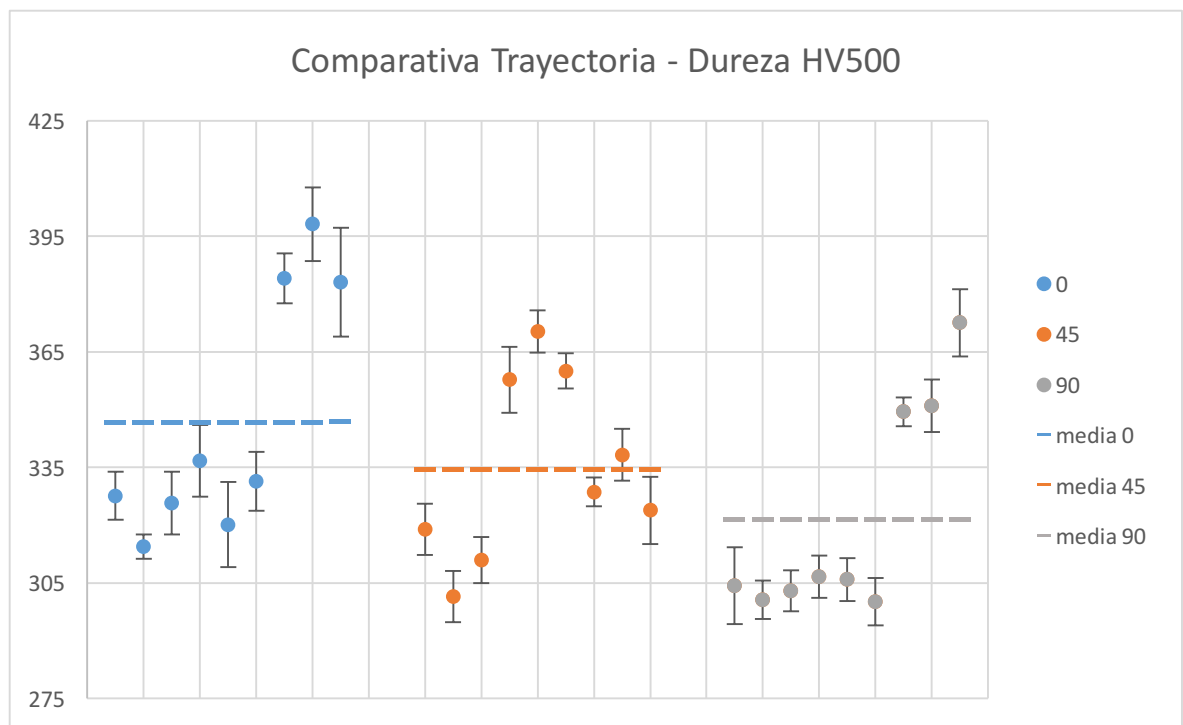


Figura 33. – Dureza HV500 según Trayectoria. Orden de huellas 1-4-7-2-5-8-3-6-9

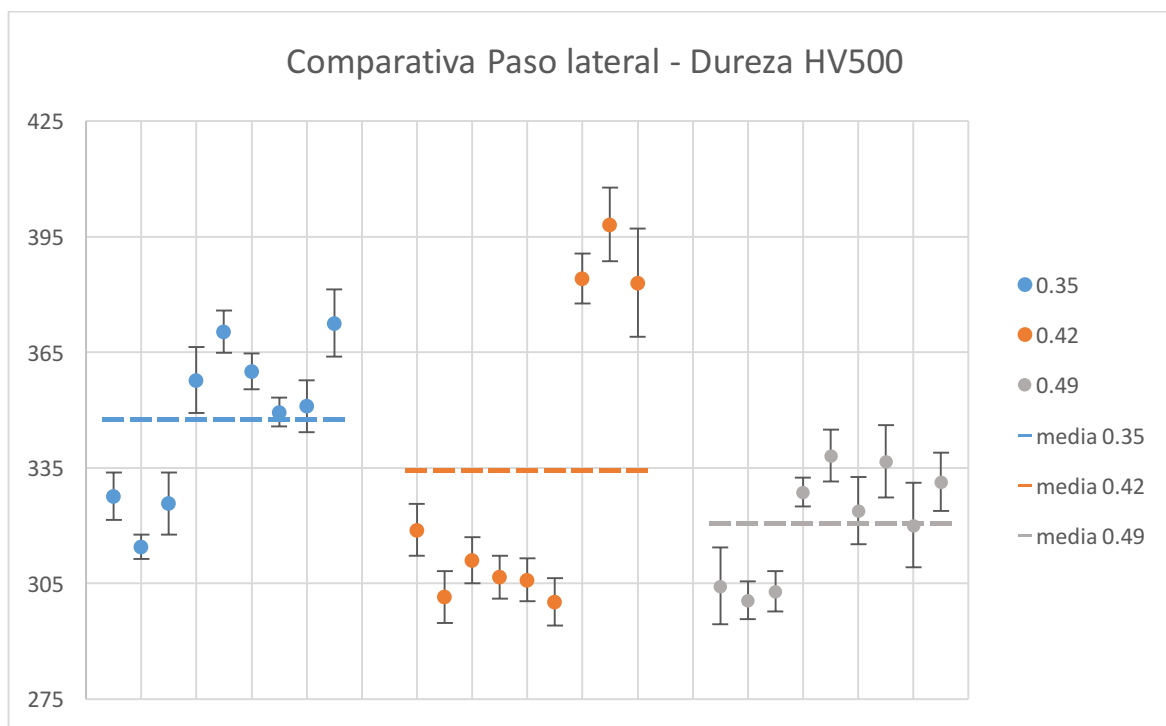


Figura 34. – Dureza HV500 según Paso lateral. Orden de huellas 1-5-9-2-6-7-3-8-4

Observando los 4 gráficos, se aprecia una tendencia creciente según aumenta el nivel de vibración o la fuerza y una tendencia decreciente según aumentan los grados de trayectoria o el paso lateral.

En la Figura 33 y la Figura 34 se observa un comportamiento bastante irregular dentro de cada grupo de huellas, con lo cual no se puede determinar con tanta seguridad que trayectoria o paso lateral sean unos factores con importante peso sobre el resultado final.

En la Figura 31 y Figura 32, aunque el comportamiento es ligeramente más regular, tampoco se observa una tendencia claramente diferenciada entre las huellas con un valor distinto dentro del mismo factor.

Dado que para este ensayo se ha utilizado un peso de 500 gramos, y a tenor de los resultados obtenidos, se va a realizar un segundo ensayo utilizando solamente 50 gramos de fuerza para ver si se obtienen valores de dureza más superficiales ya que es posible que con 500 gramos se haya traspasado gran parte, si no toda, de la capa endurecida por el bruñido y, por lo tanto, sean valores más propios del material que del acabado superficial.

Para consultar los valores obtenidos en cada una de las líneas de medición de cada huella, se puede consultar las tablas incluidas en el Anexo IV. Tablas de resultados de dureza HV500.

## 5.4. Dureza HV50. Análisis gráfico

Con este nuevo ensayo lo que se pretende es profundizar menos a la hora de hacer la indentación y, por lo tanto, mantenernos en una capa más superficial para ver si la dureza obtenida aumenta, efecto provocado por la acumulación de tensiones residuales debido al paso de la bola. En la Tabla 13 se pueden observar los resultados de dureza obtenidos usando 50 gramos de peso.

Tabla 13.- Resultados de dureza con 50 gramos de peso

		d (μm)	HV	Error	Mínimo	Máximo	Medidas	Media
1	1	15,25	405	30	375	435	8	426
	2	14,31	455	22	433	477	7	
	3	14,93	418	18	400	436	8	
2	4	14,90	418	10	408	427	7	418
	5	14,79	426	18	408	445	8	
	6	15,05	411	17	394	428	8	
3	7	15,25	402	20	381	422	8	404
	8	15,35	397	23	375	420	8	
	9	15,12	412	30	382	442	8	
4	12	13,92	479	15	464	494	7	449
	13	14,80	424	26	399	450	4	
	14	14,46	445	19	426	464	6	
5	15	13,77	491	24	468	515	6	486
	16	14,22	460	27	433	487	5	
	17	13,55	506	21	485	527	6	
6	18	15,46	390	19	372	409	8	392
	19	15,30	398	15	383	412	8	
	20	15,51	387	16	371	403	8	
7	23	13,50	510	17	493	527	6	502
	24	13,94	479	20	459	499	8	
	25	13,42	516	17	499	533	7	
8	26	14,95	417	21	396	439	8	411
	27	15,45	389	9	380	397	7	
	28	14,74	428	15	412	443	7	
9	29	14,29	456	21	434	477	8	454
	30	14,57	439	9	430	447	7	
	31	14,12	467	15	452	482	7	

En este caso, además de obtener unos valores de dureza superiores a los realizados con el peso de 500 gramos, sí que se aprecia una tendencia más regular entre valores con huellas agrupadas.

También hay que tener en cuenta que, a pesar de tener un peso menor, el error en la medida aumenta puesto que no deja de ser una medición visual y en este caso las huellas tienen un tamaño menor y cualquier pequeña variación de distancia al medir la huella hace variar enormemente el resultado de dureza.

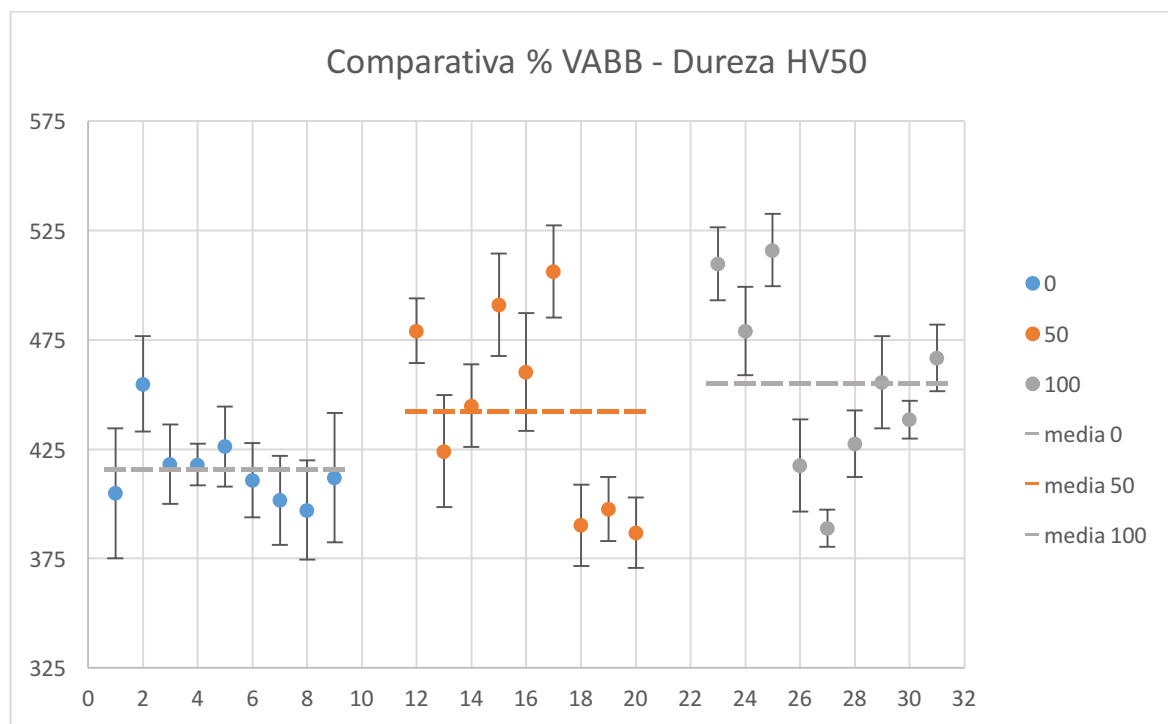


Figura 35. – Dureza HV50 según % VABB. Orden de huellas 1-2-3-4-5-6-7-8-9

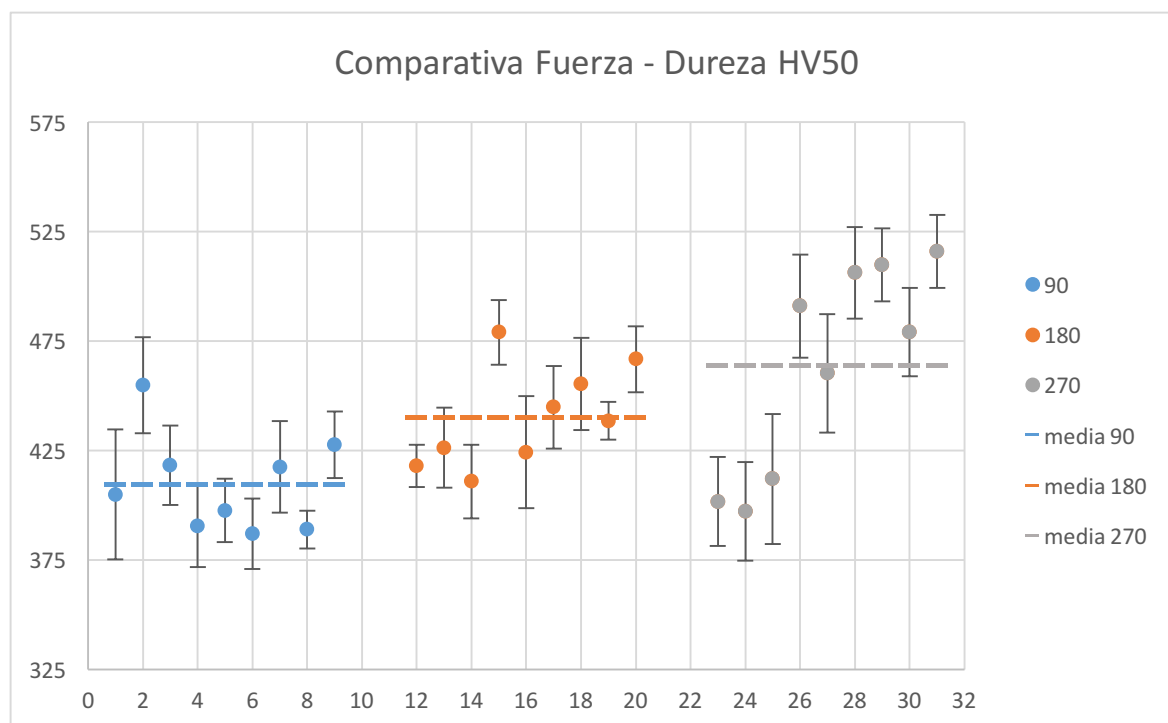


Figura 36. – Dureza HV50 según Fuerza. Orden de huellas 1-6-8-2-4-9-3-5-7

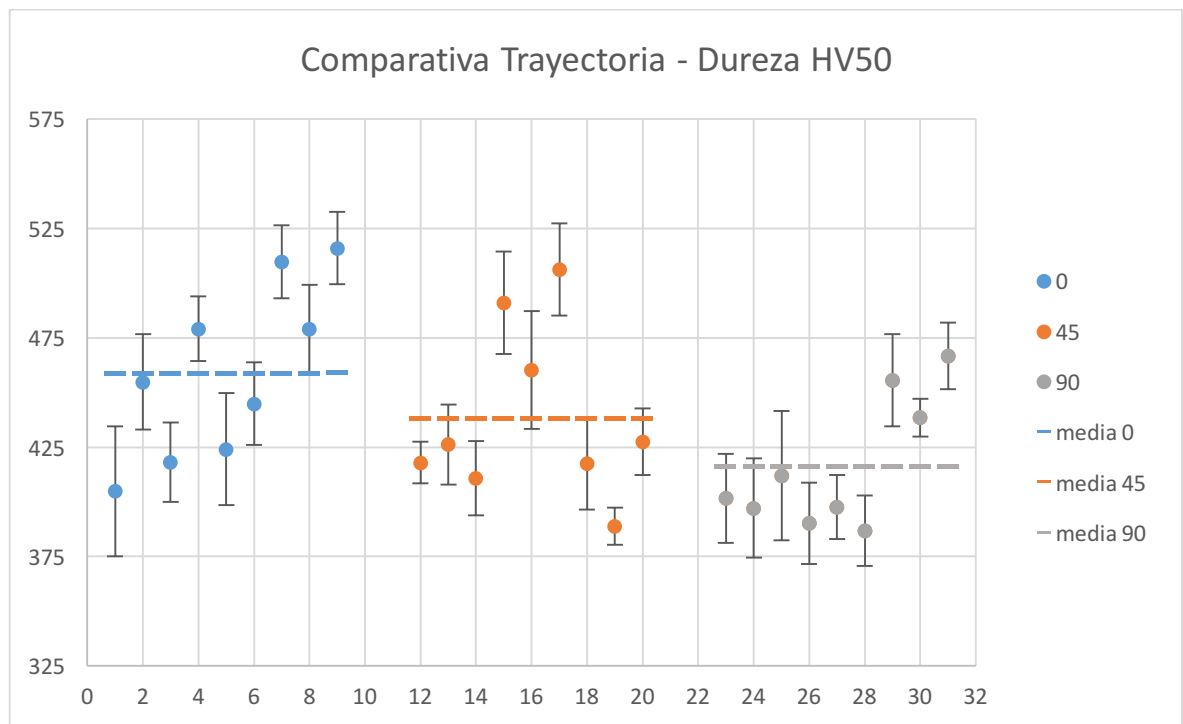


Figura 37. – Dureza HV50 según Trayectoria. Orden de huellas 1-4-7-2-5-8-3-6-9

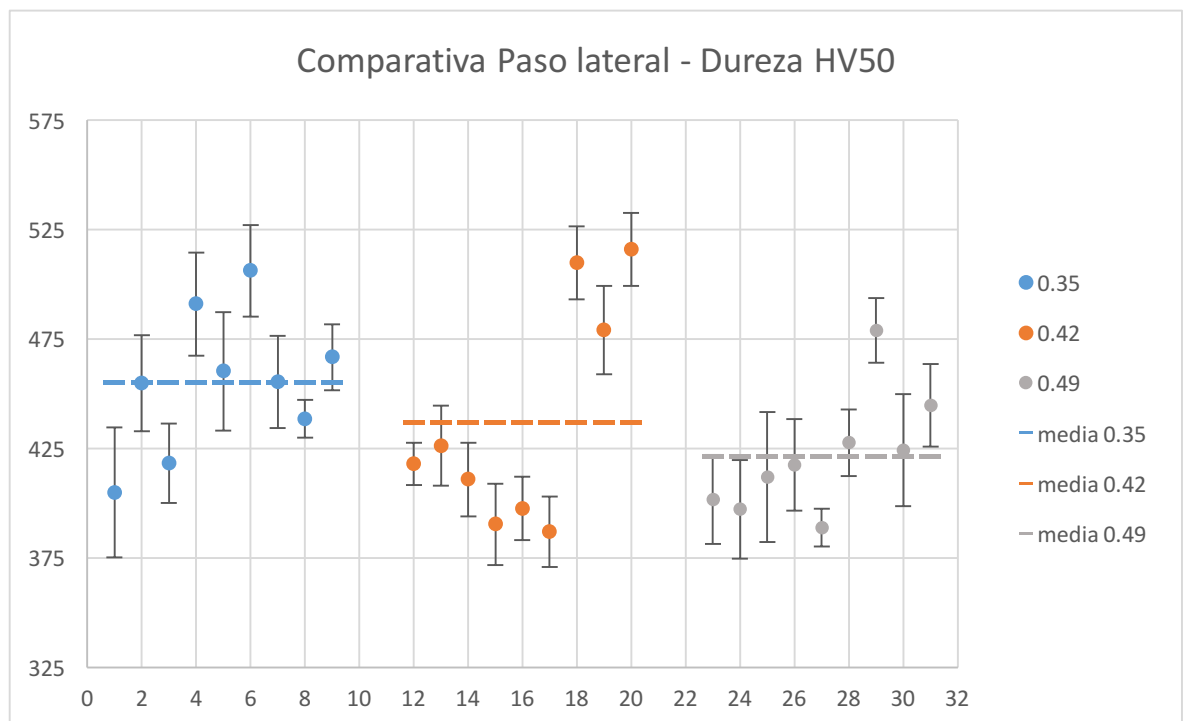


Figura 38. – Dureza HV50 según Paso lateral. Orden de huellas 1-5-9-2-6-7-3-8-4

Dado que los resultados obtenidos con este ensayo parecen más regulares, se va a realizar una representación gráfica de las 9 huellas, al estilo de la realizada con la rugosidad y aplicando un color de fondo en función de su nivel de dureza, la mayor de color rojo y la inferior de color verde. Cada huella está identificada con los valores de cada factor de ensayo y, en el centro, los dos valores de dureza final (el de dureza con 50 gramos a la izquierda y el de dureza con 500 gramos a la derecha).

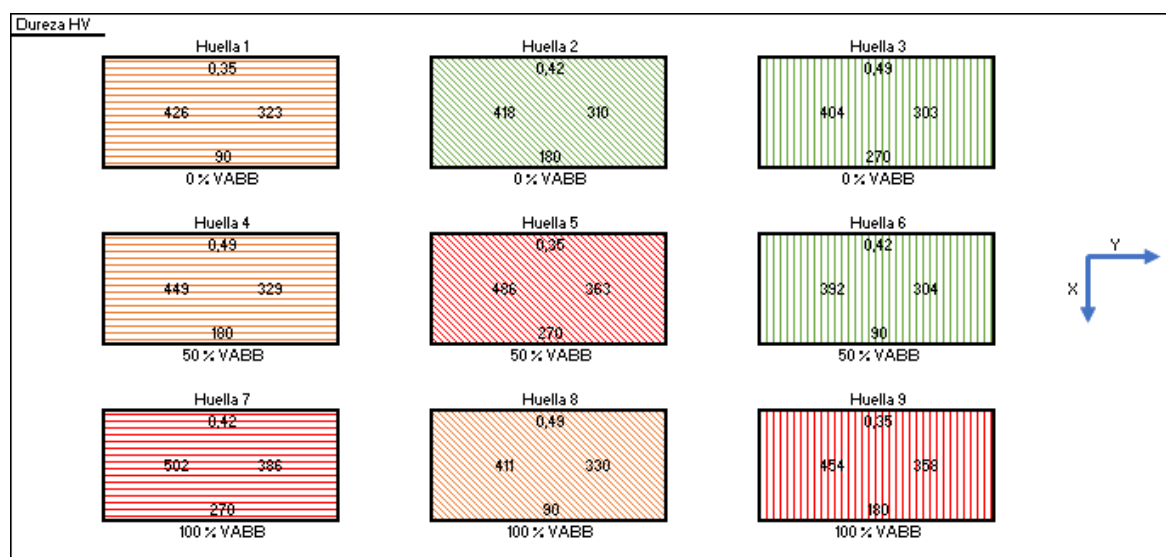


Figura 39. – Representación gráfica de los resultados de dureza HV50 y HV500

En la Figura 39 se puede apreciar que, al contrario de lo que sucede con la rugosidad, las durezas mayores no vienen determinadas por la trayectoria sino más bien por las fuerzas y los % de VABB más altos.

De todos modos, tampoco se puede afirmar que son los factores más influyentes ya que, por ejemplo, tenemos una dureza mayor en el caso de la huella 1 respecto a la 6, teniendo ésta última un 50% de VABB y un paso lateral de 0,49.

A continuación, se realizará el análisis ANOVA, igual que para la rugosidad, y que en este caso es todavía más importante ya que de manera gráfica no se aprecia de manera tan clara cuál o cuáles pueden ser los factores dominantes en el resultado de dureza final.

Todos los valores obtenidos en los ensayos pueden consultarse en las tablas incluidas en el Anexo V. Tablas de resultados de dureza HV50.

## 5.5. Dureza HV. Análisis ANOVA

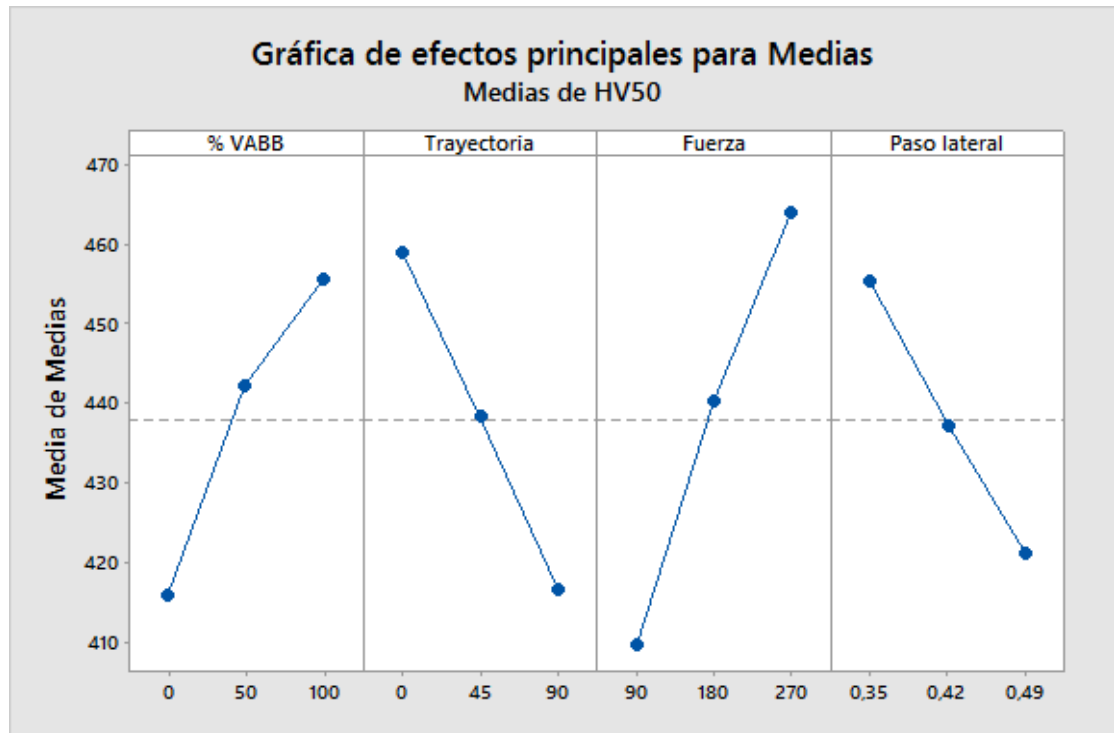


Figura 40. – Efectos principales sobre la dureza HV50

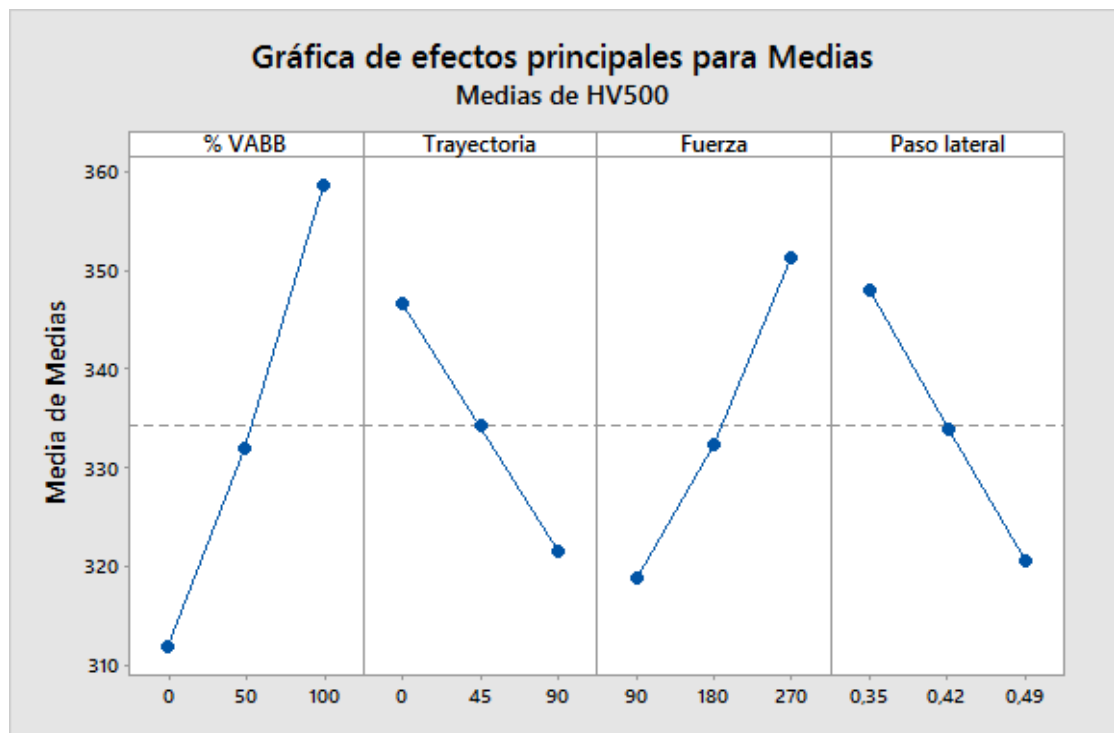


Figura 41. – Efectos principales sobre la dureza HV500

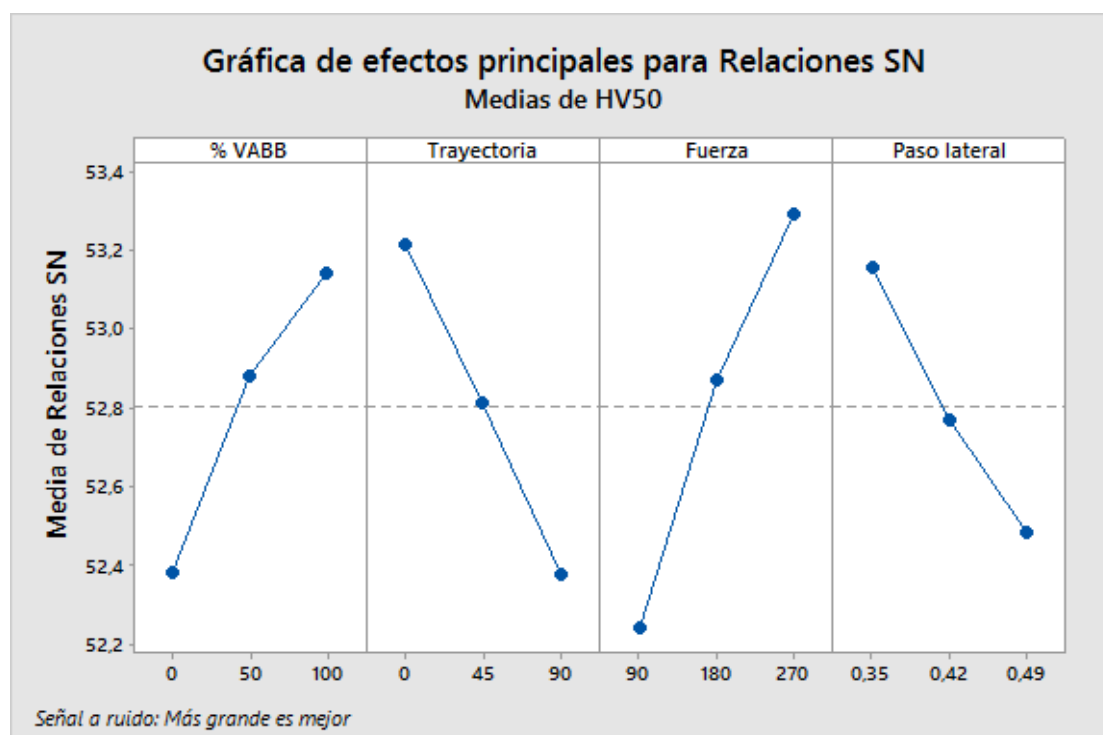


Figura 42. – Relación S/N de la dureza HV50

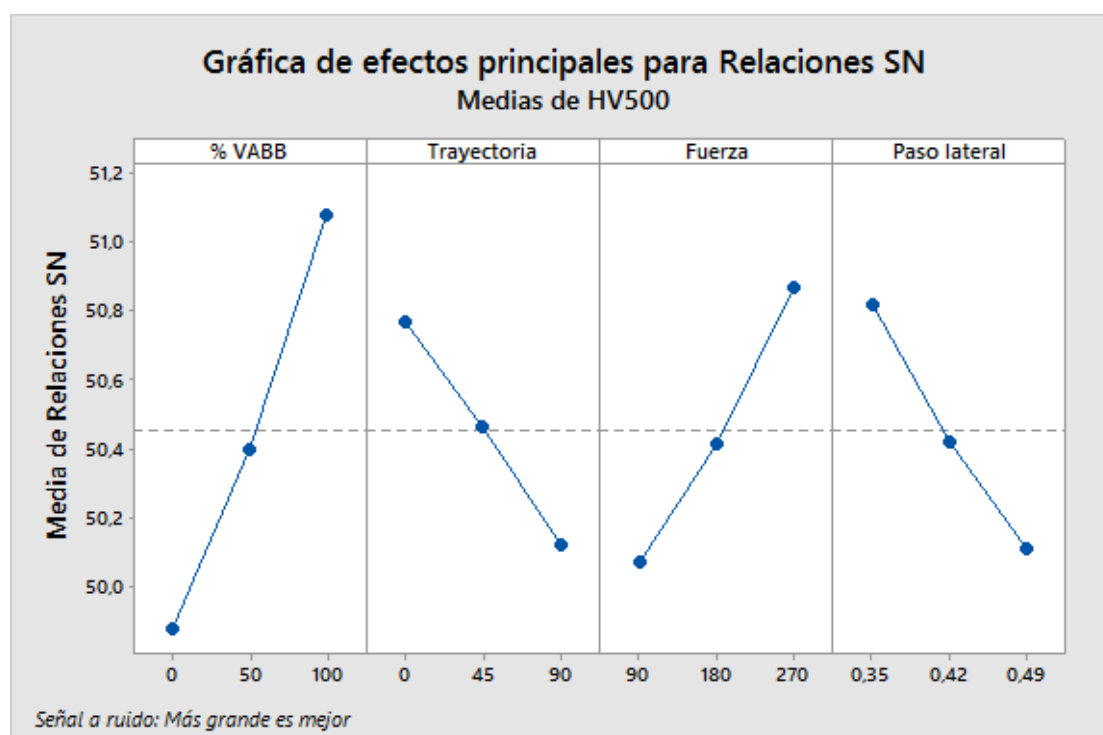


Figura 43. – Relación S/N de la dureza HV500



En la Figura 40 y Figura 41 están representados los efectos principales de los 4 factores en la dureza con ambos pesos. Tanto en el %VABB como en la fuerza, cuánto mayor es el valor mayor es la dureza obtenida (100% y 270N), mientras que en la trayectoria y paso lateral el valor es mayor cuanto menor es el valor del factor (0 y 0,35mm).

Se puede ver que, tanto en uno como en otro, el comportamiento de todos los factores es el mismo, salvo que el grado de mejora del %VABB, trayectoria y fuerza es ligeramente distinto. Mientras que en la dureza HV50 parece ser que tiene más peso la fuerza, seguido de la trayectoria y del %VABB, en el caso de la dureza HV500 es el %VABB el que mayor influencia tiene sobre el resultado, seguido de la fuerza y la trayectoria.

Teniendo en cuenta que con el peso de 500 gramos se ha traspasado parte de la dureza superficial generada por el bruñido mientras que con el de 50 no, la diferencia en el grado de mejora se podría considerar mínima.

Aun así, el hecho de que la dureza HV500 esté más influenciada por el %VABB cobra sentido si se tiene en cuenta el efecto de acustoplasticidad del que se ha hablado en el apartado 2.3.1, ya que gracias a este efecto la deformación aumenta y, por lo tanto, la tensión residual generada y el consiguiente aumento en la dureza.

Este efecto tendría menos impacto en la superficie del bruñido, dónde la tensión residual generada es menor a la generada por la fuerza o el paso lateral. Esto podría deberse a que, teniendo un paso lateral inferior o una fuerza superior, las tensiones residuales acumuladas tras el paso de la bola son mucho más altas ya que la distancia entre pasadas es menor. En la Figura 44 puede observarse una explicación gráfica de este efecto.

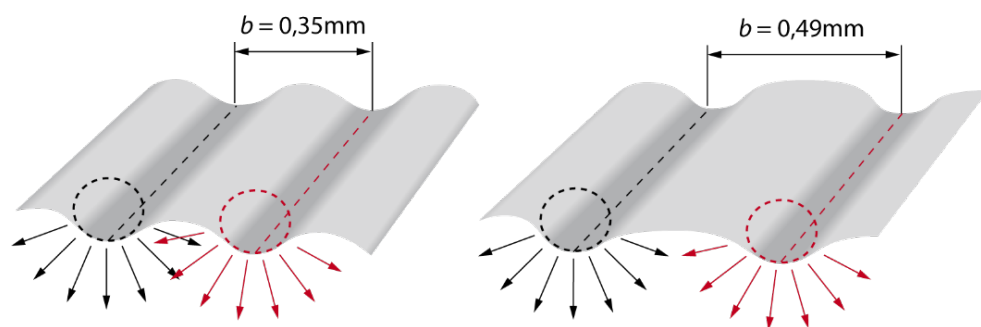


Figura 44. – Representación gráfica de las tensiones residuales provocadas por el paso de la bola, para dos pasos laterales diferentes.

En la Figura 42 y Figura 43 se puede comprobar, con comportamientos completamente idénticos a sus respectivos gráficos de efectos principales, la robustez de los datos obtenidos. En este caso, a diferencia de la rugosidad, el escenario será “Más grande es mejor” ya que la intención es maximizar la respuesta, es decir, la dureza. La ecuación para este cálculo es la (5):

$$\frac{S}{N} = -10 \cdot \log \left( \sum \frac{1/Y^2}{n} \right) \quad (5)$$

En la Tabla 14 se puede ver una comparativa de durezas y su porcentaje de mejora respecto al valor inicial. Se tomarán nuevamente como referencia los resultados de la huella 7, ya que es la que se ha realizado con el mayor número de valores óptimos de factores (100 %VABB, 270N, 0 y 0,42mm) y por lo tanto, la que mayor dureza presenta.

Tabla 14.- Comparativa de dureza inicial y final

Dureza	Inicial	Huella 7	
		Valor	Mejora
HV500	322	388	120 %
HV50		502	156 %

Tal y cómo se esperaba, al utilizar un peso de 500 gramos se ha traspasado parte de la superficie endurecida por el paso de bola ya que hay una reducción del 30% en la dureza obtenida con 50 gramos.

Aunque sigue teniendo un valor de dureza superior a la inicial, éste es inferior al de la dureza HV50, con el cual se ha visto que se pueden obtener mejoras cercanas al 160%, teniendo en cuenta que no se ha realizado una huella con todos los valores altos de factores, es decir, con 100% de VABB, 270 N, trayectoria a 0 y paso lateral de 0,35, y que, en tal supuesto, el valor de dureza con toda probabilidad sería mayor.

## Conclusiones

Tras haber estudiado las 2 propiedades físicas resultantes de realizar un proceso de bruñido con bola y analizado los resultados, se pueden obtener varias conclusiones.

Claramente, el proceso de bruñido está determinado por un eje preferente sobre el cuál se obtienen los mejores resultados en términos de rugosidad y dureza. La dirección de bruñido de la última pasada domina la magnitud de los resultados de rugosidad superficial en la pieza, resultando en los valores más bajos los medidos en dirección paralela a esta dirección. Los valores más equilibrados entre ambos ejes se han obtenido en procesos en los que se ha seguido una trayectoria a 45 grados respecto la inicial.

El proceso con vibración asistida también ha derivado en una menor rugosidad superficial respecto al proceso sin vibración en todos los casos.

En cuanto al paso lateral y fuerza, se ha detectado un empeoramiento en la rugosidad cuando se realiza con un paso superior a 0,42 mm, un 125% mayor al paso utilizado en la primera pasada de 0,35 mm, y con una fuerza de 270 N, tres veces mayor a la inicial. En ambos casos, el empeoramiento se ha producido a lo largo del eje Y, el eje preferente de la primera pasada de bruñido.

Para la dureza, no se han detectado valores críticos en ninguno de los factores, así como tampoco ningún factor dominante. Tanto la mayor fuerza como el proceso asistido por vibración han producido los mayores valores de dureza, mientras que cuánto menor ha sido el paso lateral o la trayectoria mayor ha sido la dureza. No se puede concluir, por tanto, que éstos sean los valores más óptimos en pos de obtener los mejores valores de dureza. Sería interesante poder analizarlo en futuros estudios para poder determinar si existe una fuerza crítica a partir de la cual el exceso de tensiones residuales provocase descamación o rotura de la superficie.

En términos globales se puede concluir que, para obtener los resultados óptimos de dureza y rugosidad a lo largo de un eje, hay 3 posibles escenarios:

- Si se realizan las 2 pasadas paralelas entre sí y al eje, no se debe exceder un paso lateral de 0,42 mm y una fuerza de 180 N. En éste se obtendrían unos valores altos de dureza, pero no los mayores posibles.
- Si se realizan 2 pasadas perpendiculares entre sí, la segunda ha de ser en el eje paralelo al que se deseen obtener los resultados óptimos, pero no se ha concluido que un paso lateral superior a 0,42 mm o una fuerza mayor de 180 N supongan un empeoramiento. En este escenario, los valores de dureza serían bajos.

- Si lo que se desea es obtener los resultados más equilibrados posibles, la trayectoria que se debe realizar en la segunda pasada es con una trayectoria a 45 grados de la inicial, mientras que valores de fuerza superiores a 180 N no han demostrado una mejora y no se debería exceder un paso lateral de 0,42 mm. En este caso los valores de dureza serían medios.
- En todos escenarios, el proceso con vibración asistida ha supuesto una mejora respecto al proceso no asistido.

Una vez determinado que el proceso puede mejorar sustancialmente la rugosidad y dureza a lo largo de un eje preferente, se va a analizar brevemente qué aplicaciones podría tener en la industria y qué ventajas o inconvenientes presenta respecto al proceso convencional de mecanizado por arranque de viruta:

- En situaciones en las que existe un rozamiento entre superficies, y sobre el que se sabe que va a suceder a lo largo de un eje determinado, se puede reducir considerablemente para mejorar el movimiento, reducir pérdidas por fricción, etc.
- Debido al aumento de dureza obtenido, aplicado a piezas sometidas a fatiga y estrés, podría suponer una ventaja al ser capaz de endurecer la superficie del material sin crear un material frágil en su estructura interna.
- Por otro lado, la geometría final de la pieza apenas difiere de la inicial, por lo cual es especialmente útil su uso en piezas con índices de tolerancia geométrica muy bajos y en los que se necesita calidades IT muy elevadas.
- El principal inconveniente de este proceso es que no se puede realizar en la totalidad de la superficie, siempre quedará un borde sobre el cuál no se podrá trabajar. Éste proceso está indicado para realizarse en una parte de la superficie sobre la que se va a trabajar.

Un ejemplo práctico para explicar este proceso sería el pistón de un motor. Un componente que debe moverse a lo largo de un cilindro, el cuál está sometido a un fuerte rozamiento y que tiene un claro eje de movimiento. Mediante un proceso de bruñido a lo largo del mismo eje de movimiento del pistón se podría reducir la rugosidad, y por lo tanto las pérdidas por fricción (que se traducen en pérdidas de potencia en el motor), a la vez que también se reduciría el desgaste de las paredes del cilindro, traduciéndose en una mayor vida útil del mismo y evitar un desgaste prematuro de los segmentos del pistón, que són los que realmente están en contacto con el cilindro y los que aseguran la estanqueidad en el momento de la combustión.

## Presupuesto y/o análisis económico

Dado que se trata de un proyecto de investigación en laboratorio, no se considerarán impactos medio ambientales más allá del consumo eléctrico debido al uso de maquinaria. Plantearemos un escenario en el cuál una empresa de diseño, que cuenta con laboratorio de ensayos, quiere realizar el estudio, pero no desea invertir en una máquina CNC ya que no se dedica al mecanizado y externaliza el proceso de mecanizado y bruñido. El único material que adquiere es el necesario para realizar los estudios de rugosidad y dureza, es decir, el rugosímetro y el durómetro.

Se calcularán, por tanto, los costes externos del mecanizado y bruñido, la adquisición de material y su consumo eléctrico, y las horas invertidas por un ingeniero júnior y posterior revisión del documento por parte de un ingeniero senior.

En la Tabla 15 se puede ver el desglose de todos los costes, con unos precios hora estimados de mano de obra, precios de mercado de material y estimación de costes de mecanizado y bruñido en una empresa especializada.

Tabla 15. – Estimación de costes del proyecto

Capítulo 1. Compra de material y equipos	Cantidad		Precio (€)	Total
Probeta acero AISI 1038 100x80x10 mm	1		250	250,00 €
Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-210	1		2500	2.500,00 €
Durómetro Buehler	1		3000	3.000,00 €
Ordenador	1		800	800,00 €
Capítulo 2. Alquiler de maquinaria	Cantidad	Tiempo (h)	Precio (€/h)	Total
Fresadora Lagun 600 CNC	1	3	150	450,00 €
Fresa Sandvik Ø100mm de 4 dientes	1	0,5	60	30,00 €
Herramienta de bruñido con bola	1	2,5	100	250,00 €
Capítulo 3. Mano de obra				
Mecanizado superficie	1	0,5	50	25,00 €
Bruñido por huella	9	0,25	50	112,50 €
Estudio de rugosidad por huella	21	0,5	75	787,50 €
Calibración ensayo de dureza	1	2	75	150,00 €
Estudio de dureza por huella	21	0,5	75	787,50 €

#### Capítulo 4. Costes de ingeniería

Búsqueda y análisis de información	1	50	12	600,00 €
Diseño experimento	1	2	12	24,00 €
Elaboración del código CNC	1	5	12	60,00 €
Análisis de datos	1	80	12	960,00 €
Elaboración de la memoria	1	200	12	2.400,00 €
Revisión del documento	1	10	20	200,00 €

#### Capítulo 5. Costes energéticos

	Consumo (W)	Tiempo (h)	(€/kWh)	Total
Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-210	20	22	0,17	0,07 €
Durómetro Buehler	50	25	0,17	0,21 €
Ordenador	200	300	0,17	10,20 €

**TOTAL: 13.147,99 €**

## Bibliografía

1. Murthy, R.L. Burnishing of metallic surfaces. A: *Precision Engineering*. 1981, p. 1-8.
2. Travieso-Rodriguez, J. a. et al. Experimental Study on the Mechanical Effects of the Vibration-Assisted Ball-Burnishing Process. A: *Materials and Manufacturing Processes* [en línea]. 2015, Vol. 30, núm. 12, p. 1490-1497. ISSN 1042-6914. DOI 10.1080/10426914.2015.1019114. Disponible a: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2015.1019114>.
3. Rodríguez, A. et al. Aplicación del bruñido con bola para el acabado de superficies complejas en máquinas multieje. A: *XVIII congreso nacional de ingeniería mecánica*. 2010, p. 1-8.
4. Gomez-Gras, G. et al. Experimental study of lateral pass width in conventional and vibrations-assisted ball burnishing. A: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [en línea]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, p. 1-9. ISSN 14333015. DOI 10.1007/s00170-016-8490-y. Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8490-y>.
5. Travieso-Rodriguez, J.A. et al. Effects of a ball-burnishing process assisted by vibrations in G10380 steel specimens. A: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, Vol. 81, núm. 9-12, p. 1757-1765. ISSN 14333015. DOI 10.1007/s00170-015-7255-3.
6. Gomez-Gras, G. et al. Study of a ball-burnishing vibration-assisted process. A: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [en línea]. 2015, Vol. 229, núm. 1, p. 172-177. ISSN 0954-4054. DOI 10.1177/0954405414526383. Disponible a: <http://pib.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0954405414526383>.
7. Baró Gadea, E. *Estudio de la rugosidad superficial mediante fresado de alta velocidad* [en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya, Disponible a: <http://hdl.handle.net/2099.1/18775>.
8. Sentís Sans, G. *Simulación de ensayos mecánicos* [en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2014. Disponible a: <http://hdl.handle.net/2099.1/22129>.
9. Properties of AISI 1038 Steel. A: [en línea]. Disponible a: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=aaecc27362af424ba7955511ac90d23a>.





## Anexo I. Código CNC

; Bruñidos estrategia-fuerza-paso\_lateral  
; TFG Javier Moreno  
; Tutor Ramón Jerez  
; PROTOTIPO B10PZ40k83  
; ENERO 2017

; SELECCIONAR LOS PARÁMETROS DE PROGRAMA

; =====

P0 = 50 ; coordenada X huella local  
P1 = 100 ; coordenada Y huella local  
P3 = 0.35 ; valor absoluto paso lateral en mm  
P5 = 10 ; ancho huella en mm  
P15 = 0 ; contador de pasadas

P25 = 1	; SELECCIONAR ESTRATEGIA	1=PERP	2=PAR	3=45DEG
P2 = -1.5	; valor NEGATIVO coordenada Z fuerza	-0.7=90N	-1.8=180 N	-3=270N
P4 = 1	; multiplicador paso lateral	1	1.2	1.4

; =====

; FUNCIONES DE PREPARACIÓN Y POSICIONAMIENTO

G54

G00 G90 X0 Y0 Z10

; PRIMERA PASADA

G01 XP0 YP1 Z1 F300

G01 ZP2

\$WHILE P3\*P15 < P5

G91 G1 YP5

XP3

Y-P5

XP3

P15 = P15 + 2

\$ENDWHILE

; SEGUNDA PASADA

\$IF P25 == 1

\$GOTO N10

\$ELSEIF P25 == 2

\$GOTO N20

\$ELSE

\$GOTO N30

\$ENDIF

; ESTRATEGIA PERP

N10: P15 = 0



```

$WHILE P3*P15 < P5
G91 G1 X-P5
YP3*P4
XP5
YP3*P4
P15 = P15 + 2
$ENDWHILE
Z10
M30

```

#### ; ESTRATEGIA PAR

```

N20: P15 = 0
G91 G1 XP3*P4/2
$WHILE P3*P15 < P5
G91 G1 X-P3*P4
YP5
X-P3*P4
Y-P5
P15 = P15 + 2
$ENDWHILE
Z10
M30

```

#### ; ESTRATEGIA 45DEG

##### ; PRIMERA MITAD DE LA HUELLA

```

N30: P15 = 1
$WHILE P15*P3*P4*2/SQRT[2] < P5
G91 G1 X-P3*P4*2/SQRT[2]
XP15*P3*P4*2/SQRT[2] YP15*P3*P4*2/SQRT[2]
P15 = P15 + 1
YP3*P4*2/SQRT[2]
X-P15*P3*P4*2/SQRT[2] Y-P15*P3*P4*2/SQRT[2]
P15 = P15 + 1
$ENDWHILE
P15 = P15-1
X-P3*P4*2/SQRT[2]

```

##### ; SEGUNDA MITAD DE LA HUELLA

```

$WHILE P15 > 0
G91 G1 XP15*P3*P4*2/SQRT[2] YP15*P3*P4*2/SQRT[2]
X-P3*P4*2/SQRT[2]
P15 = P15 - 1
X-P15*P3*P4*2/SQRT[2] Y-P15*P3*P4*2/SQRT[2]
YP3*P4*2/SQRT[2]
P15 = P15 - 1
$ENDWHILE
Z10
M30

```

## Anexo II. Tablas de resultados de rugosidad

Tabla 16.- Resultados de rugosidad con cut-off de 0,25 mm

	1				2				3			
	X		Y		X		Y		X		Y	
	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt
	0,235	1,056	0,126	0,685	0,136	0,748	0,129	0,626	0,066	0,397	0,190	0,950
	0,231	1,040	0,128	0,755	0,116	0,654	0,121	0,653	0,051	0,305	0,186	0,856
	0,220	0,996	0,125	0,648	0,110	0,789	0,118	0,593	0,059	0,311	0,181	0,887
	0,250	1,063	0,126	0,655	0,136	0,690	0,112	0,666	0,054	0,347	0,185	0,985
	0,241	1,023		0,647	0,122	0,745	0,129	0,610	0,045	0,275	0,180	0,856
	0,243	0,965	0,129	0,711	0,130	0,754	0,122	0,583	0,048	0,365	0,183	0,895
	0,221		0,131	0,770	0,129	0,698	0,127	0,627	0,050	0,325	0,178	0,963
	0,259	1,029	0,127	0,770	0,143	0,662	0,127	0,573	0,051	0,304	0,178	0,960
	0,238		0,130	0,650	0,127	0,711	0,115	0,581	0,061	0,387	0,177	0,942
0,231	1,098	0,128	0,660	0,111		0,127	0,600	0,058	0,376	0,183	0,984	
MEDIA	0,237	1,034	0,128	0,695	0,126	0,717	0,123	0,611	0,054	0,339	0,182	0,928
DESVEST	0,012	0,041	0,002	0,052	0,011	0,045	0,006	0,031	0,007	0,041	0,004	0,050
LIMITE UP	0,261	1,116	0,132	0,800	0,148	0,807	0,135	0,674	0,067	0,421	0,190	1,028
LIMITE DOWN	0,213	0,952	0,124	0,591	0,104	0,626	0,111	0,549	0,041	0,257	0,174	0,828

	4				5				6			
	X		Y		X		Y		X		Y	
	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt
	0,181	0,812	0,057	0,394	0,119	0,611	0,140	0,618	0,053	0,316	0,155	0,850
	0,190	0,716	0,066	0,425	0,125	0,566	0,132	0,547	0,071	0,413	0,150	0,923
	0,183	0,777	0,054	0,415	0,112	0,481	0,128	0,600	0,081	0,492	0,153	0,897
	0,171	0,789	0,061	0,478	0,119	0,552	0,125	0,624	0,087	0,464	0,170	0,909
	0,195	0,845	0,062	0,435	0,118	0,551	0,129	0,554	0,061	0,428	0,156	0,854
	0,187	0,852	0,064	0,376	0,117	0,523	0,127	0,607	0,061	0,368	0,154	0,830
	0,197	0,746	0,063	0,420	0,120	0,535	0,136	0,553	0,085	0,603	0,160	0,784
0,177	0,805	0,062	0,478	0,118	0,545	0,134	0,549	0,097	0,622	0,172	0,945	
0,200	0,754	0,058	0,359	0,120	0,580	0,136	0,540	0,082	0,507	0,155	0,861	
0,171	0,723	0,057	0,462	0,116	0,542	0,134	0,572	0,074	0,421	0,156	0,904	
MEDIA	0,185	0,782	0,060	0,424	0,118	0,549	0,132	0,576	0,075	0,463	0,158	0,876
DESVEST	0,010	0,047	0,004	0,041	0,003	0,034	0,005	0,032	0,014	0,096	0,007	0,049
LIMITE UP	0,206	0,877	0,068	0,506	0,125	0,617	0,142	0,641	0,103	0,656	0,173	0,973
LIMITE DOWN	0,164	0,687	0,053	0,343	0,112	0,480	0,123	0,511	0,048	0,270	0,144	0,779

7				8				9				
X		Y		X		Y		X		Y		
Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	Ra	Rt	
0,130	0,712	0,046	0,399	0,113	0,487	0,132	0,628	0,050	0,356	0,166	0,775	
0,168	0,729	0,033	0,308	0,105	0,482	0,098	0,576	0,061	0,362	0,171	0,837	
0,130	0,693	0,042	0,368	0,114	0,490	0,115	0,682	0,051	0,330	0,167	0,716	
0,167	0,785	0,038	0,379	0,109	0,422	0,115	0,631	0,054	0,369	0,162	0,792	
0,189	0,693	0,039	0,272	0,111	0,537	0,114	0,569	0,051	0,340	0,181	0,723	
0,162	0,748	0,037	0,252	0,106	0,425	0,115	0,598	0,072	0,319	0,163	0,834	
0,182	0,735	0,047	0,450	0,107	0,503	0,092	0,640	0,051	0,315	0,182	0,801	
0,142		0,039	0,376	0,118		0,107	0,632	0,070	0,339	0,170	0,869	
0,149	0,798	0,045	0,426	0,112	0,485	0,103	0,626	0,062	0,337	0,168	0,895	
0,147	0,762	0,039	0,341	0,118	0,486	0,109	0,670	0,058	0,318	0,172	0,783	
MEDIA	0,157	0,739	0,041	0,357	0,111	0,480	0,110	0,625	0,058	0,339	0,170	0,803
DESVEST	0,020	0,038	0,004	0,064	0,005	0,036	0,011	0,036	0,008	0,019	0,007	0,058
LIMITE UP	0,197	0,815	0,049	0,485	0,121	0,552	0,132	0,698	0,074	0,376	0,184	0,918
LIMITE DOWN	0,116	0,664	0,032	0,229	0,102	0,408	0,088	0,553	0,042	0,301	0,157	0,687

	SUPERFICIE			
	X		Y	
	Ra	Rt	Ra	Rt
	0,195	0,999	0,324	1,570
	0,220	1,102	0,304	1,422
	0,170	0,909	0,297	1,398
	0,231	1,074	0,383	1,646
	0,238	1,251	0,360	1,253
	0,187	1,041	0,390	1,685
	0,232	1,222	0,279	1,387
	0,196	1,037	0,333	1,810
	0,228	1,182	0,307	1,536
	0,266	1,297	0,307	1,514
MEDIA	0,216	1,111	0,328	1,522
DESVEST	0,029	0,123	0,038	0,164
LIMITE UP	0,274	1,358	0,404	1,851
LIMITE DOWN	0,159	0,865	0,253	1,193

## Anexo III. Tablas de resultados de calibración de dureza HV

Tabla 17.- Resultados de dureza del ensayo sobre patrón de longitud para calibración visual

Patrón ( mm)	Medida 1 ( mm)	Medida 2 ( mm)	Medida 3 ( mm)	Medida 4 ( mm)	Medida 5 ( mm)
10	9,74	10	9,96	9,65	9,99
20	19,65	19,8	19,8	19,47	19,99
30	29,52	29,89	29,8	29	29,88
40	39,58	39,46	39,3	38,94	39,73
50	49,55	49,31	49,6	48,9	49,95
60	59,25	59,16	59,04	58,85	59,5
70	68,73	68,61	68,74	68,54	69,77
80	78,66	78,53	78,54	78,54	79,39
90	88,25	88,1	88,18	88,57	88,98

Tabla 18.- Resultados de dureza del ensayo sobre patrón de 700 HV

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
35,57	36,11	36,35	701,8
35,52	35,88	36,21	707,3
35,51	35,45	35,98	716,1
35,66	35,75	36,21	707,1
35,75	36,03	36,40	699,8
35,41	35,63	36,02	714,5
35,40	35,56	35,98	716,1
35,68	35,81	36,25	705,5
35,58	35,37	35,98	716,3
35,47	35,83	36,16	709,3
Media		36,2	

Carga (g)	500	5,000
-----------	-----	-------

Objetivo	100
----------	-----

	Valor	Error
Pendiente	1,01776	0,00194
Intersec. (μm)	-0,12766	0,10748

λ (μm)	0,40
--------	------

Resolución óptica (μm)	0,21
------------------------	------

Medidas buenas	10
----------------	----

HV	Error
709,4	12,0

[illegible]

HV	Error
322,4	8,6

## Anexo IV. Tablas de resultados de dureza HV500

Tabla 20.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
51,52	54,04	53,59	322,9
52,83	54,23	54,35	313,8
51,57	53,50	53,34	325,9
52,93	52,56	53,55	323,3
50,72	51,44	51,86	344,8
49,30	49,06	Descartado	Descartado
50,97	53,01	52,79	332,8
52,11	52,32	53,01	329,9
	Media	53,2	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
327,6	12,4

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
53,43	54,01	54,55	311,6
52,43	54,02	54,04	317,5
51,89	52,47	Descartado	Descartado
52,46	53,67	53,88	319,4
53,12	54,24	54,51	312,1
53,27	54,31	54,62	310,8
53,09	53,82	54,28	314,7
52,71	54,16	54,26	315,0
	Media	54,3	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
314,4	6,3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
51,53	52,78	52,95	330,7
51,05	50,82	51,71	346,7
52,77	52,42	53,40	325,1
53,98	55,05	55,36	302,6
52,45	52,78	53,42	324,9
54,22	53,71	54,80	308,8
51,50	50,83	51,95	343,6
52,64	52,81	53,53	323,5
	Media	53,4	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
325,7	16,2

Tabla 21.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 2

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
53,46	55,64	55,39	302,2
53,03	53,30	53,98	318,2
51,82	54,09	53,77	320,7
50,29	54,56	53,23	327,2
53,55	54,01	54,61	310,9
51,54	52,79	52,96	330,5
54,03	54,40	55,05	305,9
51,35	52,24	52,59	335,3
Media		53,9	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
318,9	13,3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
52,93	52,66	53,60	322,7
54,26	55,11	55,53	300,7
54,99	56,64	56,68	288,6
55,09	55,90	56,35	292,0
54,72	54,83	55,62	299,7
53,12	54,83	54,81	308,7
53,96	53,56	54,59	311,2
56,06	55,66	56,72	288,2
Media		55,5	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
301,5	13,4

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
54,63	56,27	56,31	292,4
52,54	54,67	54,43	313,0
54,21	53,66	54,77	309,1
53,02	52,59	53,62	322,5
54,30	54,57	55,27	303,5
53,64	54,65	54,98	306,7
52,24	54,20	54,04	317,5
53,17	52,40	53,59	322,8
Media		54,6	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
311,0	11,9



Tabla 22.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
56,23	57,79	57,89	276,6
51,49	52,40	52,74	333,3
55,07	54,75	55,76	298,2
54,59	54,82	55,55	300,5
51,86	52,17	52,81	332,4
54,71	54,99	55,70	298,9
56,04	55,87	56,82	287,2
54,05	54,09	54,90	307,6
Media		55,3	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
304,3	19,9

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
54,60	54,35	55,31	303,0
54,99	55,39	56,04	295,2
53,48	55,85	55,51	300,9
54,02	54,23	54,96	307,0
55,22	55,58	56,26	293,0
53,26	54,60	54,76	309,2
53,87	54,05	54,79	308,9
55,15	56,65	56,77	287,7
Media		55,5	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
300,6	9,9

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
53,57	55,22	55,23	303,9
53,09	53,21	53,97	318,4
54,60	55,88	56,09	294,7
54,64	55,60	55,97	296,0
54,81	54,84	55,67	299,2
53,86	54,57	55,05	305,9
54,30	54,75	55,37	302,5
Media		55,3	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
302,9	10,6

Tabla 23.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 4

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
50,79	50,75	51,54	349,0
50,20	49,57	50,64	361,5
52,26	52,46	53,16	328,1
55,27	53,77	55,36	302,5
50,74	50,81	51,55	348,9
51,85	50,97	52,20	340,3
52,06	51,24	52,44	337,2
52,09	52,93	53,31	326,2
Media		52,5	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
336,7	18,7

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
54,61	55,20	55,75	298,3
53,64	53,97	54,63	310,6
51,06	53,56	53,11	328,7
51,46	52,68	52,87	331,7
52,05	52,17	52,91	331,2
Media		53,9	

Medidas buenas	5
----------------	---

HV	Error
320,1	22,0

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
50,55	52,05	52,08	341,8
50,11	52,51	52,09	341,7
51,82	53,71	53,57	323,0
49,51	52,11	51,58	348,4
51,44	53,52	53,28	326,6
51,80	53,55	53,48	324,1
53,78	53,25	54,34	314,0
Media		52,9	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
331,4	15,2

Tabla 24.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 5

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
51,25	51,28	52,05	342,3
49,76	49,84	50,56	362,7
51,22	51,33	52,06	342,1
50,63	50,18	51,17	354,1
48,65	48,34	49,23	382,6
46,82	47,39	Descartado	Descartado
50,10	50,81	51,22	353,4
49,72	49,27	50,25	367,2
Media		50,9	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
357,8	17,2

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
49,58	50,14	50,62	361,9
45,81	45,42	Descartado	Descartado
53,34	56,82	Descartado	Descartado
48,85	49,36	49,85	373,1
48,60	48,87	49,47	378,8
49,17	50,10	50,39	365,2
49,53	49,52	50,28	366,8
48,36	49,47	49,66	376,0
Media		50,0	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
370,3	11,0

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
49,17	49,73	50,20	367,9
50,01	50,55	51,05	355,8
49,96	49,94	50,71	360,6
50,21	50,74	51,24	353,1
49,79	49,90	50,60	362,1
52,81	56,43	Descartado	Descartado
47,03	46,47	Descartado	Descartado
49,84	50,05	50,70	360,6
Media		50,8	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
360,0	9,3

Tabla 25.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 6

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
52,98	54,49	54,56	311,5
53,86	55,06	55,30	303,2
53,52	53,94	54,56	311,5
55,54	54,88	56,06	295,0
54,32	55,54	55,78	298,0
54,28	55,34	55,66	299,3
52,34	53,25	53,60	322,7
53,13	54,27	54,53	311,9
Media		55,0	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
306,6	11,1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
53,93	53,52	54,55	311,6
54,15	55,40	55,62	299,7
55,24	55,52	56,24	293,2
54,06	54,98	55,36	302,5
56,12	56,51	Descartado	Descartado
53,82	54,42	54,95	307,0
52,70	53,35	53,84	319,9
53,66	54,52	54,92	307,4
Media		55,1	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
305,9	11,2

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
54,06	54,55	55,14	304,9
52,86	53,39	53,94	318,7
55,47	56,19	56,69	288,5
54,10	54,72	55,25	303,8
55,65	56,20	56,79	287,5
55,71	55,68	56,56	289,9
53,86	54,93	55,23	303,9
54,10	54,64	55,21	304,2
Media		55,6	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
300,2	12,2

Tabla 26.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 7

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
49,75	49,17	50,21	367,8
48,51	48,94	49,46	379,0
48,31	48,18	48,97	386,6
48,23	48,05	48,87	388,3
47,99	48,13	48,79	389,6
47,99	47,48	48,46	394,9
43,47	42,87	Descartado	Descartado
48,79	49,77	50,03	370,5
47,73	47,59	48,38	396,1
	<b>Media</b>	49,1	

<b>Medidas buenas</b>	8
-----------------------	---

HV	Error
384,1	13,0

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
42,47	42,09	Descartado	Descartado
46,56	46,06	47,00	419,6
47,78	47,42	48,32	397,1
48,88	48,65	49,50	378,4
47,95	47,97	48,68	391,2
47,00	48,52	48,48	394,5
46,81	47,12	47,67	408,0
	<b>Media</b>	48,3	

<b>Medidas buenas</b>	6
-----------------------	---

HV	Error
398,1	19,2

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
49,74	49,41	50,33	366,1
47,88	48,18	48,76	390,1
46,29	46,97	47,33	413,9
43,17	42,82	Descartado	Descartado
48,97	49,63	50,05	370,2
47,44	47,07	47,97	403,0
50,45	50,22	51,10	355,1
	<b>Media</b>	49,3	

<b>Medidas buenas</b>	6
-----------------------	---

HV	Error
383,0	28,2

Tabla 27.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 8

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
52,57	52,84	53,51	323,8
50,49	50,58	Descartado	Descartado
52,15	52,53	53,14	328,3
52,07	52,70	53,19	327,8
52,27	52,10	52,98	330,3
52,61	52,23	53,22	327,3
51,49	51,81	52,44	337,2
52,49	52,59	53,35	325,8
Media		53,1	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
328,6	7,5

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
49,18	51,39	51,05	355,8
56,83	57,41	Descartado	Descartado
51,60	51,96	52,57	335,5
52,30	52,10	53,00	330,1
52,74	52,90	53,63	322,4
51,68	51,38	52,32	338,7
50,99	51,09	51,82	345,3
51,40	51,50	52,24	339,8
Media		52,4	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
338,2	13,5

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
53,93	54,09	54,84	308,3
51,69	51,63	52,45	337,0
52,69	54,05	54,19	315,7
54,36	54,00	55,01	306,3
52,96	52,00	53,28	326,6
50,33	50,16	51,01	356,3
53,39	53,78	54,41	313,2
52,25	52,58	53,22	327,4
Media		53,6	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
323,9	17,5

Tabla 28.- Resultados de dureza con 500 gr en huella 9

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
56,44	56,09	57,14	284,0
51,54	51,34	52,23	339,9
50,54	51,68	51,89	344,3
48,62	49,22	49,66	376,0
50,59	51,19	51,67	347,3
51,69	52,04	52,66	334,4
48,42	48,72	49,30	381,4
47,58	48,70	48,87	388,3
Media		51,7	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
349,5	31,8

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
49,24	50,74	50,75	360,0
50,04	49,83	50,69	360,8
50,00	51,81	51,68	347,1
51,86	51,95	52,70	333,9
49,52	50,09	50,56	362,7
50,16	52,48	52,10	341,5
Media		51,4	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
351,0	16,3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
51,30	50,99	51,93	343,9
46,73	46,55	47,34	413,7
50,60	51,33	51,74	346,3
48,56	48,61	49,32	381,2
46,83	46,57	47,40	412,6
51,48	51,76	52,41	337,6
Media		50,0	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
372,5	40,7

## Anexo V. Tablas de resultados de dureza HV50

Tabla 29.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,88	15,18	15,17	402,9
13,88	13,75	13,93	477,6
16,11	16,42	16,43	343,6
15,90	15,79	16,00	362,2
14,82	14,99	15,04	409,8
15,49	15,74	15,76	373,1
13,07	13,42	13,35	520,0
16,17	16,07	16,28	349,9
Media		15,2	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
404,9	59,3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
13,74	14,23	14,11	466,0
13,13	13,04	13,19	533,0
14,26	14,42	14,47	443,0
14,23	14,56	14,52	439,6
14,49	14,14	14,44	444,6
14,98	15,10	15,18	402,4
14,20	14,09	14,27	455,4
Media		14,3	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
454,8	43,8

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
15,14	15,31	15,37	392,6
14,88	14,77	14,96	414,3
14,46	14,52	14,62	433,8
14,92	15,23	15,22	400,5
15,90	15,86	16,03	360,6
13,50	14,16	13,95	476,6
14,10	14,41	14,38	448,4
14,58	14,91	14,88	418,8
Media		14,9	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
418,2	36,2



Tabla 30.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 2

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
14,60	14,71	14,79	424,0
14,97	15,07	15,16	403,5
14,53	14,28	14,53	439,0
13,06	13,28	Descartado	Descartado
14,63	14,71	14,80	423,1
14,49	15,20	14,98	413,1
14,37	14,96	14,80	423,4
14,82	15,37	15,24	399,4
Media		14,9	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
417,9	19,1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,02	16,46	15,89	367,1
14,37	14,39	14,51	440,5
14,14	14,07	14,23	458,0
14,78	14,14	14,59	435,6
14,84	14,96	15,04	410,1
14,07	13,73	14,02	471,8
15,18	15,56	15,52	385,2
14,21	14,52	14,49	441,4
Media		14,8	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
426,2	36,7

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
14,81	15,07	15,08	407,8
14,74	14,64	14,82	422,0
15,66	16,06	16,01	361,5
14,80	14,60	14,83	421,4
13,90	14,11	14,13	464,6
15,32	15,54	15,58	382,1
15,26	15,31	15,43	389,5
14,27	14,59	14,56	437,4
Media		15,1	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
410,8	33,8

Tabla 31.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,56	14,74	14,78	424,3
16,42	17,07	16,91	324,1
15,58	15,68	15,78	372,4
14,93	14,44	14,82	422,3
15,47	15,56	15,66	377,9
14,26	14,59	14,55	437,8
14,81	15,10	15,09	407,0
14,38	14,16	14,40	447,4
Media		15,3	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
401,6	40,5

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,42	14,48	14,58	436,2
15,22	15,57	15,54	383,9
14,20	14,39	14,42	445,8
13,66	14,16	14,03	471,1
15,85	15,59	15,87	368,1
15,79	16,49	16,30	349,0
15,99	16,03	16,17	354,8
15,43	15,99	15,86	368,5
Media		15,3	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
397,2	45,3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
12,81	13,78	13,40	516,1
15,26	15,64	15,60	381,2
14,03	14,11	14,19	460,3
13,70	14,22	14,08	467,7
15,41	14,85	15,27	397,6
15,94	16,81	16,54	339,0
15,16	15,33	15,39	391,6
16,07	16,51	16,45	342,6
Media		15,1	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
412,0	59,3

Tabla 32.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 4

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
14,16	14,30	14,36	449,9
13,18	13,67	13,54	506,1
13,82	13,37	13,71	493,4
13,37	13,58	13,59	502,3
13,68	13,79	13,85	483,3
14,15	14,42	14,41	446,5
13,97	13,82	14,01	472,1
	<b>Media</b>	<b>13,9</b>	

<b>Medidas buenas</b>	<b>7</b>
-----------------------	----------

HV	Error
479,1	29,6

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
14,58	15,11	14,98	413,1
13,44	12,79	Descartado	Descartado
15,13	15,17	15,29	396,5
14,31	14,99	14,78	424,3
13,46	14,61	14,16	462,6
12,72	13,13	Descartado	Descartado
12,06	11,81	Descartado	Descartado
	<b>Media</b>	<b>14,8</b>	

<b>Medidas buenas</b>	<b>4</b>
-----------------------	----------

HV	Error
424,1	51,3

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
13,89	13,83	13,98	474,5
13,95	13,92	14,05	469,4
14,70	14,96	14,97	414,0
13,11	12,88	Descartado	Descartado
14,50	14,38	14,57	436,8
13,82	14,14	14,10	466,3
13,31	13,52	Descartado	Descartado
15,22	14,66	15,08	407,8
	<b>Media</b>	<b>14,5</b>	

<b>Medidas buenas</b>	<b>6</b>
-----------------------	----------

HV	Error
444,8	37,8

Tabla 33.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 5

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
13,01	13,21	13,22	530,9
12,81	13,41	13,22	530,9
13,87	14,94	14,53	439,0
13,62	14,47	14,17	462,0
13,70	13,89	13,91	479,0
13,15	13,74	13,56	504,5
15,73	16,08	Descartado	Descartado
15,18	15,29	Descartado	Descartado
Media		13,8	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
491,1	47,0

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,55	14,72	14,77	425,2
12,28	12,51	Descartado	Descartado
13,19	13,99	13,70	493,7
14,15	14,74	14,57	436,5
14,21	14,64	14,55	437,8
12,27	13,02	Descartado	Descartado
13,21	13,59	13,51	508,0
Media		14,2	

Medidas buenas	5
----------------	---

HV	Error
460,2	54,0

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,98	15,20	Descartado	Descartado
13,49	13,25	13,48	510,3
14,96	14,72	Descartado	Descartado
13,20	12,98	13,19	532,5
14,35	13,83	14,21	459,0
13,24	13,11	13,28	525,6
12,80	13,29	13,15	536,3
13,95	13,79	13,99	473,8
Media		13,6	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
506,3	41,9

Tabla 34.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 6

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,52	15,96	15,89	367,1
14,46	15,57	15,15	403,7
14,47	14,76	14,75	426,3
14,39	15,02	14,84	421,1
15,62	16,49	16,21	352,8
15,72	16,08	16,05	359,7
16,11	16,15	16,29	349,5
14,24	14,46	14,48	442,4
Media		15,5	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
390,3	37,1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,40	15,72	15,71	375,7
14,75	14,99	15,01	411,7
15,41	15,96	15,84	369,7
14,90	14,47	14,82	422,3
14,81	14,83	14,96	414,5
16,23	15,59	16,06	359,3
14,12	14,80	14,59	435,6
15,38	15,10	15,38	391,8
Media		15,3	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
397,6	29,2

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,27	15,84	15,70	376,0
14,97	15,26	15,26	398,4
14,06	14,59	14,45	443,9
15,36	16,01	15,84	369,7
15,80	15,99	16,05	359,9
15,41	15,42	15,56	382,9
15,99	16,34	16,32	347,9
14,44	15,15	14,93	415,9
Media		15,5	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
386,8	32,2

Tabla 35.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 7

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
12,85	11,50	Descartado	Descartado
13,84	14,13	14,11	466,0
13,33	13,00	13,27	526,4
13,30	13,75	13,64	498,5
13,05	13,56	13,41	515,3
12,89	13,33	13,22	530,9
13,24	13,20	13,33	522,0
11,96	12,04	Descartado	Descartado
Media		13,5	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
509,9	33,4

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,55	14,20	14,50	440,8
13,09	13,46	13,38	517,7
14,01	13,77	14,01	472,4
12,91	13,19	13,15	535,8
13,69	14,02	13,97	474,9
13,82	13,55	13,80	486,8
13,43	13,79	13,72	492,3
14,86	14,88	15,01	411,7
Media		13,9	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
479,1	40,6

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
13,06	12,85	13,06	543,8
13,75	13,65	13,82	485,8
11,77	12,06	Descartado	Descartado
12,79	13,27	13,13	537,5
13,47	13,57	13,63	498,9
13,32	13,88	13,71	493,0
12,90	12,83	12,97	551,5
13,42	13,55	13,60	501,5
Media		13,4	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
516,0	33,2

Tabla 36.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 8

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,54	15,91	15,88	367,8
14,70	14,51	14,74	426,9
15,34	15,72	15,68	377,2
14,09	14,37	14,36	449,9
13,77	13,91	13,96	475,9
13,51	14,46	14,11	466,0
15,62	15,03	15,47	387,4
15,80	14,80	15,44	388,7
Media		15,0	

Medidas buenas	8
----------------	---

HV	Error
417,5	42,1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,56	15,37	15,61	380,4
14,90	15,49	15,34	394,2
14,92	14,79	14,99	412,6
15,73	14,99	15,51	385,7
14,18	13,68	Descartado	Descartado
15,59	15,11	15,49	386,2
15,50	15,64	15,72	375,3
15,21	15,43	15,46	387,7
Media		15,4	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
388,8	17,1

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d (μm)	HV
15,15	14,87	15,15	404,0
15,03	14,93	15,12	405,7
14,40	14,82	14,74	426,6
14,83	13,84	14,46	443,3
14,75	15,19	15,11	406,2
14,28	14,72	14,63	433,2
13,59	14,14	13,98	474,2
13,16	13,03	Descartado	Descartado
Media		14,7	

Medidas buenas	7
----------------	---

HV	Error
427,6	30,3

Tabla 37.- Resultados de dureza con 50 gr en huella 9

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
13,23	13,20	Descartado	Descartado
13,46	13,68	13,68	495,2
14,23	14,46	14,47	442,7
14,25	15,03	14,77	424,9
12,63	13,47	Descartado	Descartado
13,19	13,69	13,55	504,9
14,54	14,06	14,43	445,5
14,52	14,93	14,86	419,9
Media		14,3	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
455,5	44,8

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,21	13,65	14,05	469,7
14,71	14,84	14,91	417,1
14,67	14,87	14,90	417,4
13,05	13,39	Descartado	Descartado
13,65	13,87	13,88	481,5
17,51	17,63	Descartado	Descartado
14,54	15,37	15,09	407,0
Media		14,6	

Medidas buenas	5
----------------	---

HV	Error
438,5	49,4

d1 (u.a.)	d2 (u.a.)	d ( $\mu\text{m}$ )	HV
14,25	14,03	14,26	455,7
12,60	12,42	Descartado	Descartado
13,23	13,57	13,51	508,0
14,25	13,96	14,23	458,0
14,70	15,08	15,03	410,6
13,52	13,81	13,78	488,3
13,58	14,00	13,91	479,4
12,75	13,05	Descartado	Descartado
Media		14,1	

Medidas buenas	6
----------------	---

HV	Error
466,7	42,6